

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Studijní program: N 3106 Textilní inženýrství
Katedra netkaných textilií

Inteligentní matrace pro prevenci proleženin

Smart mattress for bedsores prevention

Autor: **Bc. Petra Luberdová**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Novák**

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 58

Počet obrázků: 28

Počet tabulek: 9

Počet příloh: 3

Zadání diplomové práce

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rešerši se zaměřením na distribuci mechanického napětí objemnými stlačitelnými materiály.
2. Navrhněte postup „nepřímého“ kontaktního tlaku návrh realizujte.
3. Proved'te ověřovací měření a získané výsledky vhodným způsobem vyhodnot'te.
4. Získané výsledky diskutujte s ohledem na využitelnost v praxi.

P R E H L Á S E N I E

Bola som oboznámená s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Zb., o autorskom práve, hlavne § 60 – školské dielo.

Beriem na vedomie, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mojich autorských práv užitím mojej diplomovej práce pre vnútornú potrebu TUL.

Ak použijem diplomovú prácu alebo poskytnem licenciu k jej využitiu, som si vedomá povinnosti informovať o tejto skutočnosti TUL; v tomto prípade má TUL právo odo mňa požadovať úhradu nákladov, ktoré vynaložila na vytvorenie diela, až do jej skutočnej výšky.

Diplomovú prácu som vypracovala samostatne s použitím uvedenej literatúry a na základe konzultácií s vedúcim diplomovej práce.

V Liberci, dňa 13.05. 2011

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Touto cestou si dovoľujem poďakovať vedúcemu diplomovej práce Ing. Ondřejovi Novákovi za cenné rady, pomoc a vedenie pri vypracovaní diplomovej práce a Ing. Jiřímu Kulovi za pomoc a rady pri práci v programe Matlab.

Tiež by som chcela poďakovať katedre netkaných textílií za umožnenie namerania vlastností polyuretánových pien a firme BPP spol. s.r.o. za poskytnutie vzoriek na túto diplomovú prácu.

Moje poďakovanie patrí tiež mojím rodičom, priateľom a známym, ktorí ma akoukoľvek formou podporovali počas štúdia.

ANOTÁCIA

Diplomová práca sa zaoberá návrhom inteligentného matraca pre prevenciu preležanín.

Cieľom práce bolo určiť a stanoviť kontaktný tlak nepriamou metódou pomocou vhodne stanovených výpočtových vzťahov. V rešerši boli riešené pasívne antidekubitné systémy (matrace), pomocou ktorých je možné predísť preležaninám vzniknutých pôsobením tlaku. Simuláciou mechanických vlastností bolo možné zobrazit' šírenie tlaku v polyuretánovej pene. Na základe výsledkov simulácie bola stanovená hypotéza s návrhom možného postupu stanovenia kontaktného tlaku. Najprv bola stanovená funkcia distribúcie napätia. Pomocou tejto funkcie bolo možné namerané hodnoty preložiť krivkou, ktorá popisuje ich závislosť. Pomocou troch tenzometrických snímačov (čidiel) umiestnených v rovine boli určené silové odozvy pri deformácii peny. Z nich bolo možné stanoviť vzdialenosť čidla od zdroja napätia. Tieto hodnoty vzdialenosti boli použité pre určenie miesta pôsobiaceho tlakového napätia. Na základe zistených výsledkov bolo možné určiť kontaktný tlak bez nutnosti priameho merania v mieste kontaktu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Polyuretán, pena, preležaniny, mechanické vlastnosti.

ANNOTATION

The Diploma thesis deals with the suggestion of the intelligent mattress for the prevention of the decubitus.

The aim of this thesis is to determine the contact pressure by using of the indirect method and with a help of the suitable calculating relations. In the summary there were solved the passive anti-decubitus systems due to them is possible to prevent the decubitus. By the simulation of the mechanical qualities it was possible to show the spreading of the pressure in the polyurethane foam. On the basis of the its results it was determined the hypothesis with the suggestion of the possible procedure of determining of the contact pressure. At first the function of distribution of the voltage was determined. By using of this method it was possible to fill the measured values by the curve which describes their addiction on the contact pressure. The force responses by the deformation of the foam were determined by three tensometric sensors which were placed on the flat surface. From these forces was possible to found out the distance of the sensors from the voltage source. These values of the distance were used for determination of the place of the causing pressure voltage. On the basis of the results it was possible to define the contact pressure without the necessity of the direct measurement in the place of the contact.

KEY WORDS

Polyurethane, foam, bedsores, mechanical properties.

OBSAH

ÚVOD.....	12
1 REŠERŠNÁ ČASŤ.....	13
1.1 Dekubity	13
1.1.1 Fáze dekubitov.....	13
1.1.2 Príčiny vzniku dekubitov.....	14
1.1.3 Prevencia proti dekubitom.....	14
1.1.4 Antidekubitné systémy.....	15
1.2 Polyuretán.....	16
1.2.1 Chemické zloženie polyuretánovej peny.....	17
1.2.2 Proces tvorby polyuretánovej peny.....	18
1.2.3 Typy polyuretánových pien.....	21
1.3 Mechanické vlastnosti polyuretánových pien	22
1.3.1 Vlastnosti polyuretánových pien.....	26
2 TEORETICKÁ ČASŤ	28
2.1 Simulácia mechanického napätia polyuretánových pien	28
2.2 Stanovenie hypotézy pre nepriame meranie tlaku	33
2.3 Vstupné parametre a postup pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku	34
2.4 Nahradenie nameraných hodnôt distribúcie napätia pomocou funkcie	35
2.5 Stanovenie kontaktného tlaku pomocou priesečníku dvoch kružníc	37
2.6 Stanovenie kontaktného tlaku pomocou priesečníku troch gulí.....	37
2.6.1 Štatistické charakteristiky.....	39
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	40
3.1 Cieľ experimentu	40
3.1.1 Použité materiály.....	40
3.1.2 Vybrané vlastnosti a označenie vzoriek PU pien.....	40
3.1.3 Použité meracie zariadenie.....	41
3.2 Popis experimentu.....	42
3.3 Príklad výpočtu pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku.....	44
3.3.1 Určenie funkcie distribúcie napätia PU pien.....	45
3.3.2 Určenie polohy zdroja napätia pomocou priesečníku dvoch kružníc.....	46
3.3.3 Určenie polohy zdroja napätia pomocou priesečníku troch gulí.....	48

3.4	Výsledky experimentálnych a nameraných hodnôt polohy zdroja napätia.....	49
4	DISKUSIA	51
5	ZÁVER	54
6	POUŽITÁ LITERATÚRA.....	56
7	PRÍLOHY	59

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

<i>Symbol, Skratka</i>	<i>Popis</i>
atď.	a tak ďalej
CO ₂	oxid uhličitý
EO	etylénoxid
F	сила [N]
g	gram
kg	kilogram
KOH	hydroxid draselný
m	meter
m ³	meter kubický
mm	milimeter
min	minúta
N	označenie normálnej peny
-OH	hydroxylová skupina
Obr.	obrázok
Pa	Pascal (jednotka tlaku)
PL	polyester
PO	propylénoxid
PU	polyuretán
R	označenie vysoko elastickej „studenej“ peny
r	polomer
t.j.	to je
V	označenie viskoelastickej; „lenivej“ peny
vid'.	vidieť
x	označenie osy x
y	označenie osy y
°C	stupeň Celzius
%	percentuálne
σ	napätie [Pa]
ε	deformácia [%]

ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

- Obr. 1 Tvorba polyuretánu
- Obr. 2 Proces tvorby polyuretánovej peny
- Obr. 3 Krivka napätia a deformácie elastickej peny
- Obr. 4 Tlakové namáhanie elastických, plastických a krehkých pien
- Obr. 5 Ťahové namáhanie elastických, plastických a krehkých pien
- Obr. 6 a) otvorená štruktúra PU peny; b) uzavretá štruktúra PU peny
- Obr. 7 Krivky napätia a deformácie plynu otvorenej a uzavretej štruktúre buniek
- Obr. 8 Napätie z profilu peny pri stlačení 20 %
- Obr. 9 Napätie z profilu peny pri stlačení 40 %
- Obr. 10 Napätie z profilu peny pri stlačení 60 %
- Obr. 11 Napätie z profilu peny pri stlačení 80%
- Obr. 12 Napätie na hornom povrchu peny pri stlačení 20 %
- Obr. 13 Napätie na hornom povrchu peny pri stlačení 40 %
- Obr. 14 Napätie pri hornom povrchu peny pri stlačení 60 %
- Obr. 15 Napätie pri hornom povrchu peny pri stlačení 80 %
- Obr. 16 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 20 %
- Obr. 17 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 40 %
- Obr. 18 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 60 %
- Obr. 19 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 80 %
- Obr. 20 Hustota normálneho rozdelenia pravdepodobnosti
- Obr. 21 Priesečník troch guľových plôch
- Obr. 22 Typy polyuretánových pien
- Obr. 23 Skúšobné zariadenie LabTest 2.050 doplnené o detailný popis
- Obr. 24 Detail tenzometrického snímača umiestneného v stojane
- Obr. 25 Vzorka PU peny a) pohľad z povrchu vzorky; b) profilový pohľad na vzorku
- Obr. 26 Grafické znázornenie distribučnej funkcie vzorky peny R 4036
- Obr. 27 Grafické znázornenie vzorky R 4036 so súradnicami (pohľad z povrchu peny)
- Obr. 28 Grafické znázornenie priesečníku troch guľí

ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK

Tab. 1 Vlastnosti PU pien

Tab. 2 Priemerné hodnoty sily PU pien pri stlačení na 80 % deformáciu

Tab. 3 Priemerné hodnoty sily vysoko elastických PU pien pri stlačení na 80 % deformáciu

Tab. 4 Priemerné hodnoty sily normálnych PU pien pri stlačení na 80% deformáciu

Tab. 5 Priemerné hodnoty sily viskoelastických PU pien pri stlačení na 80% deformáciu

Tab. 6 Odhad parametrov distribučnej funkcie pri 80 % deformácií pien

Tab. 7 Vzdialenosť čidiel a poloha zdroja napätia u vysoko elastických PU pien

Tab. 8 Vzdialenosť čidiel a poloha zdroja napätia u normálnych pien

Tab. 9 Vzdialenosť čidiel a poloha zdroja napätia u viskoelastických pien

ÚVOD

Táto práca sa zaoberá návrhom inteligentného matraca, ktorý umožní stanoviť kontaktný tlak bez nutnosti jeho priameho merania. Takéto matrace môžu slúžiť k monitorovaniu kontaktného tlaku s cieľom predchádzať vzniku preležanín na citlivých častiach (miesta, kde dôjde k prednostnému vytváraniu dekubitov) tela pacientov. Preležaniny (dekubity) vznikajú v mieste medzi pokožkou pacienta a podložkou vplyvom pôsobenia tlaku. Je veľmi dôležité redukovať hodnotu tlaku pod určitú hranicu, výberom vhodnej antidekubitnej podložky a tiež ich monitorovať pomocou vhodného zariadenia. Medzi často používané podložky patria matrace z polyuretánovej peny pre ich dobré mechanické vlastnosti, medzi ktoré patrí dokonalé zotavenie materiálu po opakovanom zaťažovaní a vysoká stlačiteľnosť.

Cieľom diplomovej práce je nepriame stanovenie kontaktného tlaku na polyuretánový materiál pomocou navrhnutého postupu.

Rešeršná časť sa zaoberá chovaním polyuretánových pien a teoretická simuláciou mechanických vlastností, predovšetkým distribúcie napätia. Na základe distribúcie napätia je možné stanoviť hypotézu s návrhom možného spôsobu nepriameho merania kontaktného tlaku.

Experimentálna časť je zameraná na určenie a stanovenie vhodných výpočtových vzťahov a postupov pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku. Pomocou výpočtov bude možné určiť polohu kontaktného tlaku bez nutnosti merania priamo v mieste kontaktu.

1 REŠERŠNÁ ČASŤ

Rešeršná časť je zameraná na dekubity, príčiny vzniku dekubitov a na prostriedky, ktoré slúžia pre prevenciu a terapiu dekubitov. Vzhľadom k cieľu práce sa rešerš zaoberá tiež popisom mechanických vlastností polyuretánových pien, pre ktoré bude merací postup navrhovaný.

1.1 Dekubity

Dekubity (preležaniny) sú rany spôsobené pôsobiacim tlakom na kostné výbežky, kde je tenká vrstva pokožky. Vo väčšine prípadov nimi trpia ležiaci pacienti po úraze alebo pacienti pripútaní na lôžko, popr. vozík.

Definícia

Dekubitus pochádza z latinského slova „cubo“ čo znamená „ležať“. Je to lokálne poškodenie kože alebo tkaniva kože spôsobené priamym pôsobením tlaku alebo trecími silami spôsobujúce poruchu prekrvenia tkaniva [3].

Pri nadmernej intenzite tlaku v miestach styku podložky a kože dôjde k zástave cirkulácie krvi v kapilárach a postupnému odumieraniu buniek v tkanivách. Nedochádza k prekrveniu, teda k príjmu kyslíka a živín. Dekubity sú najčastejšie v oblasti bunkového tkaniva, ktoré sa vyskytujú v koži a podkoží kostného tkaniva cez vrcholy, napríklad: v oblasti pasu, v oblasti sedacej kosti, v okolí lopatiek, v okolí päty a vonkajších členkov, kde je koža najtenšia. Dekubity vytvorené na povrchu pokožky sú spôsobené lokalizovaným podráždením kože s následnou povrchovou maceráciou a hlboké, vznikajú v podkladových tkanivách. Hlboké lézie sú často zistené, až keď dôjde k poškodeniu podkožia.

1.1.1 Fáze dekubitov

Dekubity sú rozdelené do štyroch fáz podľa vzhľadu a stupňa poškodenia kože. V prvej fáze dochádza k začervneniu pokožky po dobu 5 minút od odstránenia pôsobiaceho tlaku. Môže sa prejaviť mierny odtok na vrchnej pokožke, ale koža je neporušená. Bolesť je reverzibilná (vratná), ak je odstránený tlak a tkanivá sú stále mäkké.

V druhej fáze je vrchná vrstva pokožky (epidermis) narušená. Dochádza k vzniku pľuzgierov, plytkých otvorených rán, ktoré prenikajú do podkožnej tukovej vrstvy. Poškodené miesto je veľmi bolestivé. Liečba trvá približne 2 týždne.

V tretej fáze sa rana z kože zväčšuje a zasahuje do druhej vrstvy kože (dermis), do podkožia a tukového tkaniva. Rana je hlbšia a začína z nej vytekať páchnuca tekutina. Odhalenie tukovej vrstvy je zapríčinené odumieraním pokožky. Pacient nepocítiť bolesť pretože nervy na týchto stranách sú tlmené. Táto fáza je najviac náchylná na závažné infekcie a doba liečenia je až niekoľko mesiacov.

V poslednej fáze je zasiahnutá aj kosť. Vzniká kožná strata s rozsiahlou deštrukciou, odumieranie tkaniva sa rozširuje k základnej kosti, šľachám a kĺbovému puzdru. Nastávajú veľké bolesti a liečba trvá niekoľko mesiacov až rok (viď príloha 1) [1, 2].

1.1.2 Príčiny vzniku dekubitov

Vznik dekubitov je spojený s pôsobením tlaku v danom čase na telo pacienta, ako aj kombinácia vonkajších a vnútorných faktorov. Vplyv vonkajších faktorov je po krátkej dobe pôsobenia vysokých kontaktných tlakov, alebo po dlhšej dobe pôsobením nízkych kontaktných tlakov. Vplyv vnútorných faktorov je odolnosť tkaniva proti tlaku, taktiež pohlavie a vek pacienta, telesná hmotnosť, pohyblivosť (ochrnutie tela v rôznom rozsahu), cievne faktory, hydratácia, zaparená pokožka spôsobená inkontinenciou, nesprávna výživa, ktorá vedie k úbytku podkožného tuku a k celkovému zníženiu hmotnosti organizmu, taktiež obezita, ktorá nadmernou hmotnosťou pacienta spôsobuje problémy pri polohovaní a iné [1, 2].

1.1.3 Prevencia proti dekubitom

Jednou z foriem prevencie je správne polohovanie tela pacienta t.j., zaistiť mu pohodlnosť, hlavne príjemnú a nebolestivú polohu, kontrola stavu kože, venovať pozornosť hlavne oblastiam, kde sú kostné výbežky. Ďalšou formou je dodržiavanie hygieny hlavne u inkontinentných pacientov alebo pri potení, rehabilitácie, používanie antidekubitných pomôcok (aktívnych alebo pasívnych), zlepšenie životosprávy a dodržiavanie diéty bohatej hlavne na bielkoviny a vitamíny [1, 2].

1.1.4 Antidekubitné systémy

Funkciou antidekubitných systémov je vhodné rozloženie tlaku tela pacienta, minimalizovanie trenia a mechanického poškodenia pokožky, taktiež dostatočné zaistenie ventilácie v zaťaženej oblasti. Tieto systémy by mali poskytovať maximálnu stabilitu a komfort. Poťahy týchto matracov môžu byť paro-priepustné (nepremokavé), alebo vzdušné (premokavé). Antidekubitné systémy rozdeľujeme na aktívne a pasívne. *Aktívne antidekubitné systémy* - zbavujú tela tlaku v pravidelných intervaloch, podporujú cirkuláciu krvi (fyziologické prekrvenie) na jednotlivých častiach tela a vyživujú odľahčené tkanivá.

Pasívne antidekubitné systémy – rozkladajú tlakové zaťaženie tak, aby telo zaťažovalo podložku čo najväčšou plochou, čím sa docieli redukcia tlaku. Konštantné pôsobenie tlaku nie je fyziologický stav a niekedy aj nízky tlak môže spôsobiť čiastočné alebo úplne uzavretie ciev [3].

Pasívne antidekubitné matrace

Medzi pasívne antidekubitné matrace patria: *gélové, vodné, vzduchové a penové*. *Gélové matrace* - jadro tejto matrace je vytvorené z vysoko prispôsobivého gélu, ktorý je schopný kopírovať reliéf ľudského tela. Tieto matrace sa často používajú na operačných sálach.

Vodné matrace - princíp je rovnaký ako u gélových matraci. Sú tvorené z niekoľkých oddelených alebo čiastočne prepojených segmentov naplnených vodou.

Vzduchové matrace – sú vytvorené z radov prepojených komôr, tak aby bolo možné prepúšťať vzduch do jednotlivých častí matraca v reakcii na pohyb pacienta. Dobré rozkladajú váhu, sú pohodlné a ľahké. Je nutné často kontrolovať tlak vo vnútri matraci a dopĺňať ho.

Penové matrace – najčastejšie sú vyrobené z polyuretánovej peny v rôznej hustote a profilu. Najlacnejšie, teda najbežnejšie polyuretánové matrace sú vyrobené pri zvýšenej teplote (tzv. horúce peny), kvalitnejšie sú vyrobené inou technológiou (tzv. studené peny). Matrace vyrobené zo studených pien majú vzhľadom na svoju štruktúru dlhšiu životnosť, tvarovú stálosť, dobrú odolnosť voči mechanickému namáhaniu a dobré výsledky pri prevencii i liečbe dekubitov. Textilné materiály sú vhodné vzhľadom k fyziologickým vlastnostiam. Bola by preto vhodná kombinácia polyuretánovej peny,

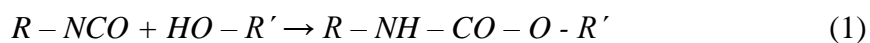
ktorá zaisťuje tvarovú stálosť a textilnej matrace, ktorá by zaisťovala napr.: odvod vodných pár, prúdenie vzduchu a odvod tepla [4].

1.2 Polyuretán

História polyuretánu siaha až do doby pred II. svetovou vojnou, kde vynálezca profesor Dr. Otto Bayer v meste Leverkusen vynášiel polyuretán. Chemická podstata polyuretánu sa od minulosti výrazne posunula v pred, ale princíp vzniku ostal ten istý.

Definícia

Polyuretán (PU) je skupina polymérov vzniknutých reakciou viacfunkčných izokyanátov s polyalkoholmi (polyol) za prítomnosti katalyzátora a ďalších prísad. Polyuretán zahŕňa epoxidy, nenásytné polyestery a fenoly. Reakciou skupiny izokyanátu $-N=C=O$ s hydroxylovou (alkohol) skupinou $-OH$ vznikajú uretány vo forme esterov kyseliny karbamovej [5].



Pri reakcii vzniká oxid uhličitý (CO_2), ktorý pôsobí ako nadúvadlo a tým vytvára penovú štruktúru. Neskôr pena stuhne.



Obr. 1 Tvorba polyuretánu [6]

1.2.1 Chemické zloženie polyuretánovej peny

Polyuretán pozostáva z dvoch základných zložiek: izokyanátov a polyolov.

Izokyanáty

Prvou dôležitou zložkou polyuretánového polyméru je izokyanát. Molekuly obsahujúce dve izokyanátové skupiny sa nazývajú diizokyanáty. Tie reagujú s mnohými zlúčeninami, ktoré obsahujú aktívne vodíkové atómy. Zlúčeniny s aktívnym vodíkom môžeme podľa klesajúcej hodnoty reaktivity zoradiť do rady: alifatické amíny → aromatické amíny → alifatické substituované močoviny → primárne alkoholy → sekundárne alkoholy → voda → fenoly → aromatické substituované močoviny. Medzi najreaktívnejšie zlúčeniny patria primárne amíny. Reakcie izokyanátu a polyhydroxy zlúčeniny je potrebné prevádzať v celku a tiež v prostredí bez vody, pretože dôjde k odštiepeniu oxidu uhličitého (CO_2) a vzniku močovínových väzieb [7].

Nevýhodou aromatických diizokyanátov je žltnutie ich produktov vplyvom svetla a kyslíka. Alifatické a cykloalifatické diizokyanáty nevykazujú žltnutie. Veľmi jedovaté sú jednoduché diizokyanáty a triizokyanáty s vysokým tlakom pár, hexametyléndiizokyanát a toluendiizokyanát. Tieto zložky reagujú so všetkými zlúčeninami, ktoré obsahujú aktívny vodík, dokonca reagujú aj s ľudským tkanivom. Izokyanáty sú veľmi dráždivé jedy [8].

Polyoly

Druhou podstatnou zložkou polyuretánového polyméru je polyol. Molekula s dvoma hydroxylovými skupinami sa nazýva diol, molekula s tromi hydroxylovými skupinami je triol, molekula so štyrmi hydroxylovými skupinami je tetrol, atď. Sú tvorené základnou katalýzou pridaním propylénoxidu (PO), etylénoxidu (EO) za vzniku hydroxylov alebo amínov, ktorý obsahuje iniciátor, alebo polyesterifikáciou z dikarboxylovej kyseliny. Tieto polyoly vytvorené polyesterifikáciou sú nazývané polyesterové polyoly. Výber iniciátora, látky pre zvyšovanie molekulovej hmotnosti (extender) a molekulovej hmotnosti polyolu ovplyvní jeho skupenstvo a fyzikálne vlastnosti polyuretánového polyméru. Charakteristické vlastnosti polyolov sú: typ iniciátora, jeho funkčnosť, molekulová hmotnosť, percento primárnej hydroxylovej skupiny a viskozita [7].

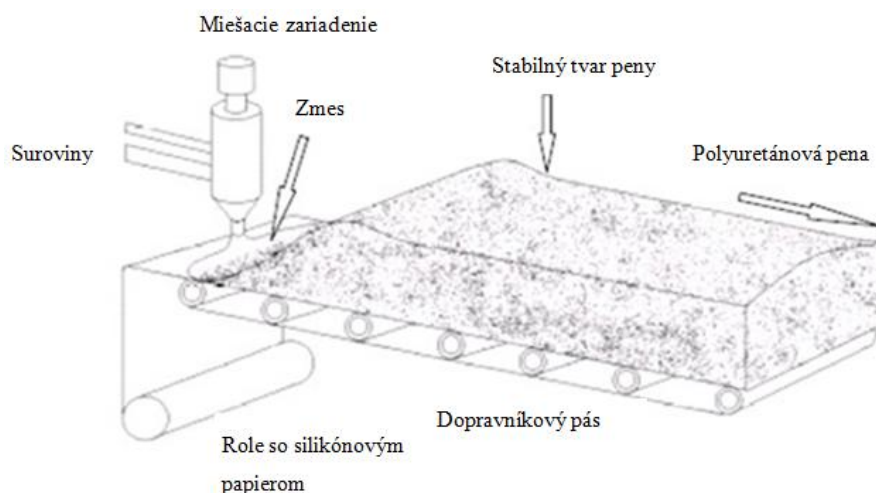
1.2.2 Proces tvorby polyuretánovej peny

Postup výroby polyuretánovej peny môže byť jednostupňový alebo dvojstupňový. Pri jednostupňovom procese výroby dochádza k zmiešaniu polyesteru, diizokyanátu a vody. Táto zmes je privedená do miešacej hlavy pomocou ktorej dochádza k dokonalému premiešaniu a následnému dávkovaniu surového materiálu na dopravníkový pás. Na dopravníkovom páse dochádza k procesu penenia a uvoľňovania oxidu uhličitého z kvapalnej zmesi. Tým, ako sa uvoľňuje plyn vo viskóznej kvapaline dochádza k vytvoreniu požadovanej štruktúry peny. Vzniká pena s otvorenou štruktúrou buniek, kde plyn môže prechádzať cez otvorené steny buniek.

Pri dvojstupňovom postupe výroby polyuretánu dochádza k príprave predpolyméru reakciou polyesteru s diizokyanátom. Po dodaní vody do zmesi dôjde k uvoľneniu plynu (CO_2) a k peniacemu procesu. Urýchlenie reakcie izokyanátu s polyesterom a vodou dosiahneme pridaním katalyzátoru (napr. terciálne amíny). Správnym výberom katalyzátora sa dosiahne rýchlejší vznik peny a zosieťovania. Veľmi dôležitá je reaktivita polyolov ako aj rozpustnosť katalyzátorov vo vode a iné. Pri nevhodnom výbere katalyzátora, môže dôjsť k zrúteniu polyuretánovej peny zapríčinené pomalým zosieťovaním alebo k predčasnemu zosieťovaniu na začiatku penenia.

Medzi často používané katalyzátory patria: terciálne amíny (slúžia ako nadúvadla) a organokovové katalyzátory (slúžia na spevňovanie). Rozptýlenie vody v zmesi urýchľuje prídavok emulgátora a veľkosť pórov peny je možné regulovať malým množstvom silikónového oleja. Po dokončení peniaceho procesu je možné rozrezanie pien do blokov.

V závislosti na zložení zmesi môžeme peny rozdeliť na tuhé, polotuhé a mäkké. Tuhé peny je možno vyrobiť pomocou aromatických diizokyanátov, polyesterov a prídavkom aromatických dikarbonových kyselín. Najmäkšie peny sú vyrobené zo zmesi alifatických diizokyanátov, alebo aj v kombinácii s polyesterovou zložkou, ako obmedzene zosieťované [9, 10].



Obr. 2 Proces tvorby polyuretánovej peny [10]

Polymerizačná reakcia ovplyvňuje fyzikálne a chemické vlastnosti, štruktúru a veľkosť molekuly látok, spracovanie a konečné fyzikálne vlastnosti hotového polyuretánu.

Tieto reakcie procesov ovládajú a upravujú látky ako:

- *Katalyzátory*
- *Povrchovo aktívne látky*
- *Sieťovanie*
- *Pomocné nadúvadla*
- *Aditíva (prísady) PU peny*

Katalyzátory

Môžu ovplyvniť nie len celkovú rýchlosť, ale aj pomer rýchlostí reakcií vedúcich k predĺženiu lineárneho reťazca. Môžu sa zúčastňovať viacerých chemických reakcií, napríklad podľa rýchlosti reakcie – pozitívne katalyzátory a podľa spomaľovania reakcie negatívne katalyzátory (inhibítory).

Povrchovo aktívne látky (PAL)

Používajú sa k úprave vlastností polyméru počas procesu penenia ako aj k stabilizácii pien. Tieto látky regulujú veľkosť bunky, stabilizujú štruktúru buniek polyuretánu, aby nedochádzalo k vzniku povrchových defektov.

Peny môžu byť tuhé alebo flexibilné. Povrchovo aktívne látky u tuhých pien slúžia k výrobe veľmi jemných buniek s uzavretou štruktúrou a u flexibilných pien slúžia k stabilizácii stien buniek a dosiahnutiu čo najviac otvorenej štruktúry buniek. Pre získanie použiteľnej peny je potrebná aspoň minimálna koncentrácia PAL. Ak je koncentrácia PAL príliš nízka, dôjde k zmršteniu peny alebo jej kolapsu. Výber PAL je ovplyvnený voľbou izokyanátu, polyolu, kompatibilitou, systémom reaktivity, hmotnosťou, podmienkou procesu, prístrojmi a zariadením a inými [10, 11].

Sieťovanie

Vytvára krátke reťazce molekúl, ktoré obsahujú amíny alebo hydroxylové funkčné skupiny. Ich funkčnosť je väčšia ako tri a toto prepojenie slúži na zvýšenie zaťažiteľnosti a zlepšenie rozmerovej stability pien.

Pomocné nadúvadla

Tieto nadúvadla obsahujú rozpúšťadla s nízkym bodom varu, sú inertné (nereagujúce) v chemických reakciách a napomáhajú k zvýšeniu mäkkosti alebo objemovej hmotnosti. Pri vysoko exotermickej reakcii zmesi pri peniacom procese dosiahne teplota až 130°C počas dvoch minút. Takto vysoká teplota spôsobí vyparovanie nízko vriaceho rozpúšťadla, čím dôjde k vytvoreniu plynu (nadúvadla). Všetky tieto pomocné nadúvadla poškodzujú ozónovú vrstvu a preto sú hľadané ekologické alternatívy spôsoby napeňovania [10, 11].

Aditíva PU peny

Medzi aditíva (prísady) v pružnej penovej hmote patria: *farbivá, spomaľovače horenia, odolnosť voči baktériám, zmäččovadlá, antistatické prípravky a kompatibilizátory*.

Farbivá - slúžia na farebné odlíšenie, identifikáciu triedy penových výrobkov alebo na zakrytie žltnutia počas používania (starnutie). V minulosti na farbenie pien používali rôzne zmesi organických pigmentov (azo/diazo farbivá, ftalocianíny, dioxazíny, sadze) a anorganických farbív (oxid titaničitý, oxid železitý, oxid chrómu). Problémom bola vysoká viskozita, penová nestabilita, prechod farieb a iné.

Spomaľovače horenia - horľavosť PU peny vzhľadom k veľkej ploche, vysokej priedušnosti a nízkej hustote je značná. Vplyv nato má: začiatočná zápalnosť, rýchlosť horenia a vývoj dymu. Medzi najpoužívanéjšie spomaľovače horenia patria: chlórované fosfátové estery, chlórované parafríny a práškový melamín.

Odolnosť voči baktériám - pri výrobe PU peny sa pridávajú špeciálne prísady proti mikroorganizmom (baktérie, kvasinky, huby), ktoré sa rozmnožujú pri určitej teplote a vysokej vlhkosti vzduchu.

Zmäkčovadla - zmäkčovací efekt sa používa pre polyoly s nižšou hmotnosťou, čím sa zvyšuje sieťovanie v štruktúre polyméru. U materiálov tak dôjde k zvýšeniu hustoty peny a k nepriaznivému vplyvu fyzikálnych vlastností.

Antistatické prípravky - PU peny majú rôzne využitie, kde je potrebné minimalizovať elektrický odpor peny. Pridaním soli ionizovateľných kovov, soli kyseliny karboxylovej, fosfátových esterov a ich zmesi sa zníži elektrický odpor a dôjde k absorpcii vlhkosti vzduchu.

Kompatibilizátory - sú špeciálne molekuly, ktoré spojením dvoch a viac miešateľných zložiek vytvárajú homogénne kvapalné fázy. Medzi tieto zlúčeniny patria: amidy, amíny, uhlíkovodíkové oleje, ftaláty, polybutylén glykoly a močoviny [12].

1.2.3 Typy polyuretánových pien

Polyuretánové peny možno vyrobiť s rôznymi vlastnosťami v závislosti od druhu použitia. Každý jeden typ peny vykazuje iné vlastnosti a slúži na iné účely. Ovplyvňujú ich fyzikálne a chemické vlastnosti polyméru. Polyméry je možné pripraviť s rôznym stupňom zosieťovania a rozvetvenia. Zmenou stupňa rozvetvenia je možné dosiahnuť plastické hmoty akéhokoľvek typu. Peny môžu byť: mäkké, tuhé, alebo polotuhé. Ďalej budú popisované len mäkké peny, pretože sa na nich sústreďí táto diplomová práca.

Mäkké polyuretánové peny

Mäkké polyuretánové peny sú v našich krajinách známe ako *Molitan*. Hydroxylovou zložkou mäkkých polyuretánových pien sa používajú lineárne rozvetvené alebo slabo rozvetvené polyestery kyseliny adipovej a diethylenglykolu s pridaním trimethylolpropanu vedľa polyetheru pripravených polymeráciou propylenoxidu, ethylenoxidu atď. Elastickejšie a stálejšie voči hydrolyze než polyester sú hmoty z polyetheru. Nie sú také odolné a teda podliehajú oxidácií. Pri príprave

mäkkých pien je veľmi dôležité, aby medzi uzlami polymérnej siete boli dlhé a elastické reťazce. Izokyanátové zložky majú preto relatívne nízke hydroxylové číslo.

Pri výrobe mäkkých integrálnych pien (150–800 kg/m³) sa používajú vysokomolekulárne polyethery. Nízkomolekulárne polyoly (ako sieťovadlo) sa u týchto pien pridáva len nepatrné množstvo. K mäkkým penám patria: vysoko elastické, normálne a viskoelastické polyuretánové peny [13].

Vysoko elastická pena „Studená pena“ – tieto peny majú veľmi dobrú priedušnosť. Je to spôsobené väčšími pórmi v porovnaní s ostatnými penami. Vykazujú lepšiu tvarovú stálosť, výborne kopírujú reliéf ľudského tela, sú komfortnejšie a tiež patria medzi tie, ktoré majú lepšie elastické vlastnosti. Používajú sa na výrobu matracov, matracových systémov ale aj na výrobu čalúnnického a koženého nábytku.

Normálna pena – táto pena patrí medzi klasické a bežne používané materiály. Má výborne tepelnoizolačné vlastnosti, vzdušnosť, pevnosť, dobrú trvanlivosť atď. Vhodná je pre použitie na výrobu matracov, čalúneného nábytku, športových potrieb atď.

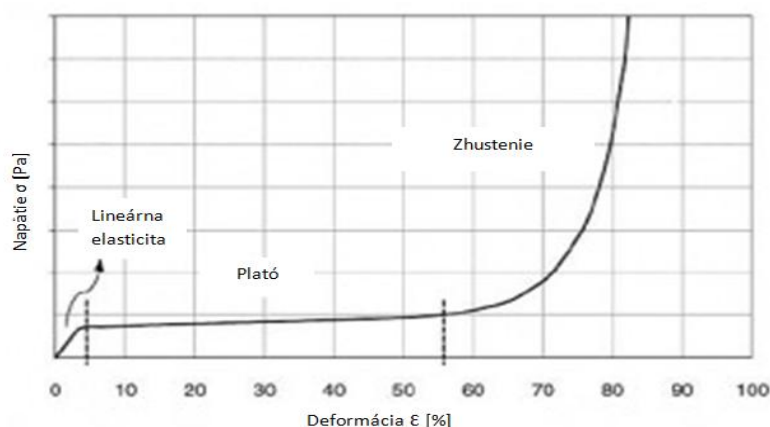
Viskoelastická pena „lenivá pena“ – tak ako aj v predchádzajúcom prípade aj tu majú tieto peny schopnosť kopírovať tvar ľudského tela podľa hmotnosti pacienta ako aj podľa teploty tela. Pri zvýšení teploty ľudského tela dochádza k mäknutiu tejto peny a zníženiu odporu proti stlačení. Tým dochádza k zníženiu pôsobiaceho tlaku, čím sa predchádza vzniku preležanín. Viskoelastická pena veľmi dobre rozkladá váhu pacienta, dochádza k zlepšeniu prekrvenia a zamedzuje sa tak vzniku preležanín. Používajú sa na výrobu vysoko komfortných matracov a anatomických vankúšov [14].

1.3 Mechanické vlastnosti polyuretánových pien

Mäkké polyuretánové peny sú mimo iné používané v zdravotníctve, kde sú vhodné na výrobu antidekubitných pomôcok. Tieto pomôcky zamedzujú vzniku preležanín, vzniknutých na citlivých častiach tela pacientov pripútaných na lôžko. Vlastnosti polyuretánových pien sú ovplyvnené morfológiou pien, hustotou, štruktúrou, účelom na ktorý boli dané peny vyrobené atď. Znalosti týchto vlastností je možné ovplyvňovať požadovaným spôsobom ich chovania, prípadne ich využiť pre rôzne aplikácie, napr. monitorované zaťaženie, tlaku apod.

Gibson a Ashby prezentovali niekoľko modelov zameraných na tlakové zaťaženie a mechanické vlastnosti penových materiálov. Krivka stlačovanej PU peny má všeobecne tri oblasti (viď obr. 3): lineárne elastickú oblasť, stabilnú oblasť (Plató) a oblasť s prudkým nárastom napätia.

Pri nízkom napätí (menej ako 5 %) sa peny správajú lineárne elasticky. Túto oblasť je možné popísať Hookovým zákonom. Pri väčšom zaťažovaní nastáva u buniek peny zrútenie stien a deformácia sa stáva nelineárne elastickou v závislosti na mechanických a geometrických vlastnostiach stien peny. Pre plató je charakteristický veľký nárast deformácie pri malom zvýšení napätia. Táto oblasť je významná pre matrace – v tejto oblasti dochádza k významnému zvyšovaniu zaťaženej plochy a redukcii kontaktného tlaku. Táto oblasť je približne lineárna. Pokiaľ sa nejedná o elastickú penu, nastáva nevratná deformácia buniek. Kontaktom stien buniek sa zvýši hustota pien, čo spôsobí prudký nárast napätia [15]. V tejto oblasti by sa pena použitá ako matrac nemala nachádzať.



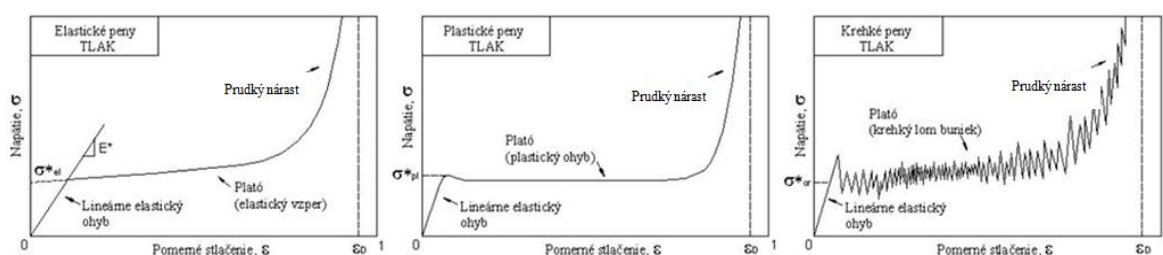
Obr. 3 Krivka napätia a deformácie elastickej peny [15]

V prípade pien s uzavretou štruktúrou dochádza pri rýchlom stlačení k prudkému nárastu odporu proti stlačeniu, pretože vzduch alebo kvapalina nestačí z peny uniknúť. Pri kompresnom namáhaní dochádza v oblasti plató ku kolapsu buniek. To je spôsobené pružným vzperom (deformáciou) pri elastických penách, kde patrí napríklad kaučuk, krehké porušenie pri krehkých penách, napr.: keramické peny a tvorením plastických zón pri plastických penách, napr.: polyméry, kovy atď.

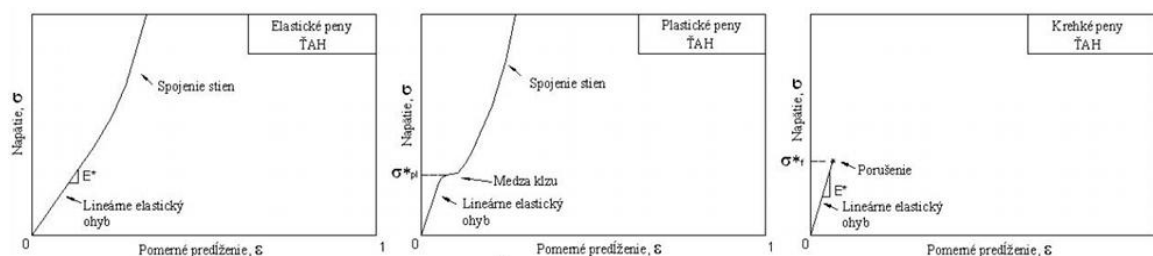
V oblasti plató dôjde k zdeformovaniu buniek a tým sa steny buniek začnú dotýkať. Pri ďalšom zaťažovaní má materiál vyplnenú celú oblasť voľných buniek, teda pena sa chová ako plný materiál a krivka prudko stúpa.

V ťahu dochádza k naťahovaniu stien buniek ako aj ohybu hrán. K tomuto dochádza na začiatku lineárnej elastickej oblasti, kde pri elastických a plastických penách dochádza k natáčaniu bunkových hrán k ose naťahovania. U elastických pien dochádza k zvyšovaniu tuhosti štruktúry a u plastických pien k plastickému ohybu. Ďalej, po prekročení medze kluzu daného materiálu, stúpa ťahová krivka k bodu, kde dôjde k porušeniu celistvosti materiálu.

Krehké peny sa chovajú inak ako elastické či plastické peny. V najslabšom mieste buniek dochádza k trhlinám, teda k poškodeniu štruktúry buniek. Niektoré peny sú v ťahu krehké a v tlaku plastické (napr. polymérne). Začnú sa postupne drviť až dôjde k úplnému rozdrveniu peny vid' obr. 4 a 5 [16].

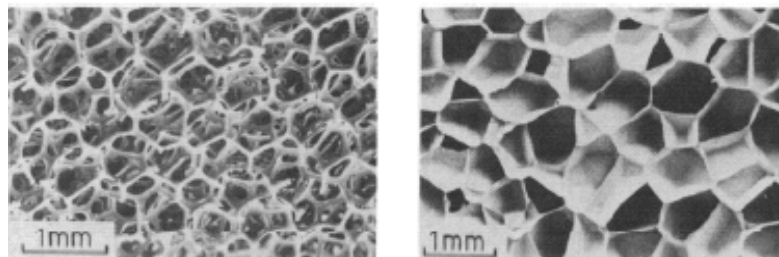


Obr. 4 Tlakové namáhanie elastických, plastických a krehkých pien [16]



Obr. 5 Ťahové namáhanie elastických, plastických a krehkých pien [16]

Polymérne peny sú nízko hustotné látky, ktoré majú využitie v mnohých oblastiach (napr.: absorpcia, odpruženie systému, sendvič materiálového jadra, atď.) vzhľadom na ich mechanické, akustické a tepelné vlastnosti. Peny môžu mať štruktúru otvorenú alebo uzavretú vid' obr. 6 a), b).



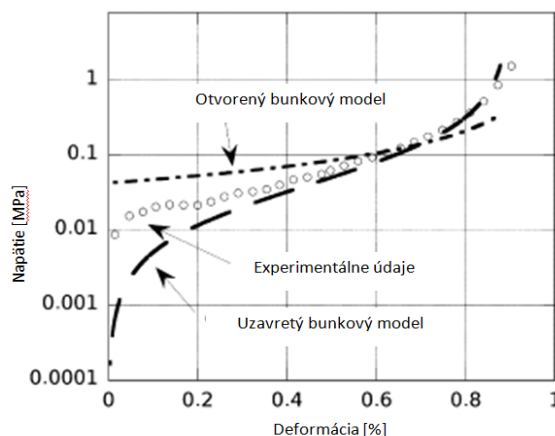
Obr. 6 a) otvorená štruktúra PU peny b) uzavretá štruktúra PU peny [13]

Peny s uzavretou štruktúrou sú tvorené z dvoch fáz: pevnej, tvorí štruktúru peny a plynnej, ktorá môže byť z fyzikálnych alebo chemických zdrojov. Majú lepšie tepelno - izolačné vlastnosti ako peny s otvorenou štruktúrou.

V otvorených štruktúrach pien, plyn stlačený počas deformácie a rýchlosť jeho vytlačovania, ktoré je zodpovedné za pohlcovanie energie, je závislé na jeho viskozite. V uzavretej štruktúre pien je napätie plynu závislé na deformácii buniek. Plyn je možné zanedbať, ak tuhosť peny je veľmi vysoká. V rôznych literatúrach bolo navrhnutých niekoľko metód na riešenie tlakového správania pien pri nízkych a vysokých rýchlostiach deformácie.

Jedným z nich bol Rusch, ktorý ako prvý predpovedal hypotézu o rôznom chovaní otvorenej štruktúry buniek v závislosti na rýchlosti deformácie.

Schwaber a Meinecke testovali otvorenú štruktúru pien a zistili, že vplyv správania pri vysokých rýchlostiach deformácie bol správne predpovedaný modelom s časovo nezávislým faktorom napätia a časovo závislým faktorom deformácie. Cieľom bolo posúdenie jednoduchšej metódy na predvídanie mechanickej odozvy peny pri vysokej rýchlosti deformácie pomocou mechanického kvazistatického stlačenia (kompresie) a termomechanickej relaxácie napätia.



Obr. 7 Krivky napätia a deformácie plynu otvorenej a uzavretej štruktúry buniek [13]

Všetky mechanické vlastnosti pien sú ovplyvnené morfológiou pien, hustotou pien, teplotou pien (pre sypké materiály) a deformačnou rýchlosťou (viskoelastické vlastnosti sypkého materiálu alebo viskozita tekutín, ktorá vyplňa peny). Výberom správneho polyméru, hustoty, morfológie získame najlepšiu kombináciu vlastností pien pre dané aplikácie. Výrobky z polyuretánovej peny by mali poskytovať hlavne pohodlie a komfort a taktiež by mali spĺňať účel, na ktorý boli vyrobené [13].

1.3.1 Vlastnosti polyuretánových pien

Medzi jednotlivé vlastnosti polyuretánových pien patrí: hustota, elasticita, priedušnosť a tuhosť.

Hustota

Hustota je charakterizovaná ako miera hmotnosti na jednotku objemu, určuje sa v jednotkách $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Ovplyvňuje životnosť PU peny ako aj jej únosnosť a patrí medzi najdôležitejšie vlastnosti pien. Ak sa pri výrobe použije vyššia hustota polyméru, tak sa pri dynamickom namáhaní dosiahne nižšia trvalá deformácia peny. Pri často namáhaných častiach výrobkoch, napr. matrace, sedačky, atď. sa odporúča používať peny s vyššou hustotou. Ak je potrebné dosiahnuť vyššiu hustotu peny, tak sa musí použiť viac materiálu na výrobu [17].

Elasticita

Strata energie je stanovená ako rozdiel energií pri stlačení a opätovnom uvoľnení peny (tzv. hysterézia). Polyuretánová pena s otvorenou štruktúrou buniek citlivo reaguje na pohyb a tlak zmenou svojho tvaru. Pri vysokej elasticite dochádza k rovnomernému rozloženiu tlaku tela pacienta na matraci ako aj k ideálnemu prispôsobeniu tvaru ľudského tela. Vďaka elasticite je spánok alebo ležanie na matraci oveľa pohodlnejšie a tiež zabraňuje tvorbe vzniku preležanín [17].

Priedušnosť

Polyuretánové peny s otvorenou štruktúrou buniek majú dobrú priedušnosť. Je to spôsobené množstvom otvorených buniek – pórov vo vnútri matraca. Čím sú bunky otvorenejšie, tým je materiál priedušnejší. Táto mechanická vlastnosť je veľmi

dôležitá hlavne kvôli hygiene pacientov a to tým, že umožňuje cirkuláciu vzduchu vo vnútri materiálu, dobre vyrovnáva teplotné rozdiely a odvádza telesnú vlhkosť [18].

Tuhosť

Tuhosť je možné charakterizovať ako deformáciu spôsobenú stlačením peny, napríklad osobou. Je to sila, ktorá spôsobuje určitú deformáciu. Peny môžu byť vysokohustotné a nízkohustotné. Závisia od štruktúry a chemického zloženia, čo môže spôsobiť napr., že peny vysokohustotné môžu byť mäkké a nízkohustotné môžu byť tvrdé [18].

Zhrnutie

Dobrou kombináciou vlastností je možné doceliť peny s veľkou pevnosťou, vysokou ťažnosťou, vysokou tvrdosťou a vysokým modulom. Vplyv na ne majú fyzikálne a chemické vlastnosti polyméru. Tieto polyméry možno pripraviť s rôznym stupňom zosieťovania a tiež aj rozvetvenia, čím je možné dosiahnuť plastické hmoty rôzneho typu od termoplastov až k reaktoplastom. Výrobky z PU peny by mali poskytovať pohodlie, komfort a taktiež by mali splňovať účel, na ktorý boli vyrobené. Polyuretánové peny sú známe svojimi vlastnosťami, ktoré majú radu výhod ako aj nevýhod.

Výhody polyuretánov je schopnosť materiálu vrátiť sa do pôvodného stavu, dobrá odolnosť voči minerálnym olejom, benzínu, alkoholom, éterom, odolávajú proti pôsobeniu kyslíka a ozónu, majú malú priepustnosť pre plyny, dobrú pevnosť, odolnosť voči vibráciám, proti atmosférickým vplyvom, dobré zvukové, tepelno - izolačné vlastnosti a chemická odolnosť voči starnutiu.

K nevýhodám patrí: zlá odolnosť voči kyselinám, zásadám a vriacej vode [9].

2 TEORETICKÁ ČASŤ

V teoretickej časti je popísaná simulácia zaťažovania PU peny pomocou guľového zaťažovacieho telesa, na ktorej je znázornená distribúcia napätia. Simulácia bola urobená z dôvodu nenájdenia popisu podobnej problematiky v literatúre. V mieste pôsobenia bolo možné sledovať šírenie napätia pomocou tzv. izoplôch a na základe toho bola stanovená hypotéza s návrhom zvolenej výpočtovej metódy pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku. Ďalej bola popísaná zvolená distribučná funkcia napätia, pomocou ktorej boli namerané hodnoty preložené krivkou popisujúcou ich závislosť. Distribučnou funkciou bolo možné určiť vzdialenosti (polomery) tenzometrických snímačov (čidiel) od miesta zdroja napätia na základe silových odoziev z čidiel. Poloha zdroja napätia bola určená tromi spôsobmi: priesečníkom dvoch kružníc, troch guľových plôch, alebo grafickým znázornením priesečníku pomocou programu Matlab. Na základe týchto priesečníkov troch guľí (dvoch kružníc) bolo možné určiť miesto zdroja napätia.

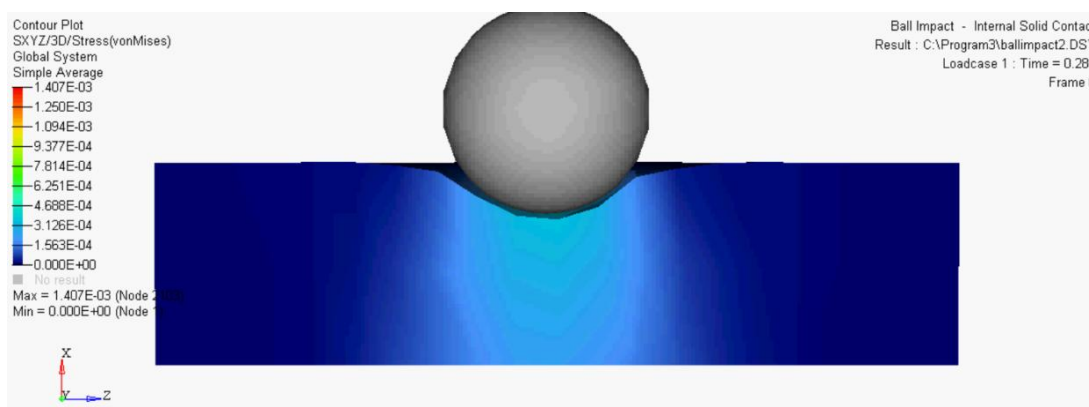
2.1 Simulácia mechanického napätia polyuretánových pien

Simulácia šírenia napätia v polyuretánovej pene bola vytvorená pomocou programu PAM – CRASH. Tento priemyselný softvérový systém od firmy ESI Group je určený k vykonávaniu štandardných bariérových testov, pre numerické simulovanie testov mechanických štruktúr atď. Pomocou tohto softvéru je možné simulovať aj chovanie polyuretánovej peny pri jej zaťažovaní [19].

Pomocou uvedeného softvéru bola vytvorená simulácia zaťažovania peny guľovým zaťažovacím telesom (priemer 52 mm). Parametre modelu nie sú popísané. Geometria modelu bola vytvorená tak, aby odpovedala v budúcnosti prevedenému experimentu. Simulovaná bola elastická pena s hustotou 35 kg/m^3 . Polyuretánová pena s rozmermi $250 \times 250 \times 50 \text{ mm}$ bola umiestnená na pevnej podložke a zaťažovacia sila pôsobila kolmo k povrchu peny. Guľové zaťažovacie teleso sa pohybovalo v smere osy „x“ súradného systému simulácie až k dosiahnutiu 80 % deformácie peny (40 mm). Získané snímky zobrazujú distribúciu napätia pomocou izoplôch v priereze peny na jej dolnom a hornom povrchu pri rastúcej deformácii. Izoplochy sú charakterizované ako plochy o rovnakej hodnote, v tomto prípade o rovnakom napätí. Tieto izoplochy farebne

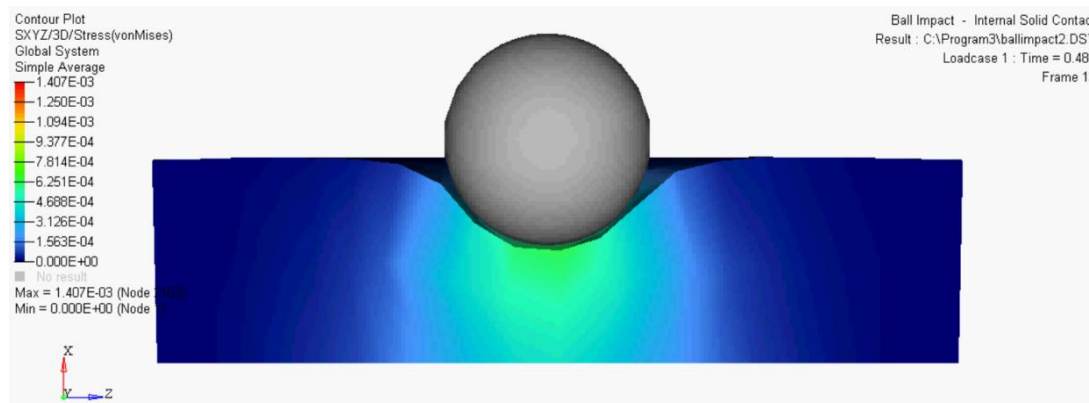
rozlišujú hodnoty (veľkosť) napätia, pomocou farebnej palety umiestnenej v ľavej časti obrázku. Na tejto farebnej palete bolo možné určiť hodnoty kontaktného tlaku v konkrétnych miestach peny, pôsobiaceho v sledovanom materiáli. Oblasti zobrazené červenou farbou predstavujú najväčšie koncentrácie tlaku a svetlo až tmavo modrou farbou zobrazujú miesta s najnižšou koncentráciou tlaku.

Na obr. 8 až 11 je znázornené šírenie napätia v priereze polyuretánovej peny. Prvá simulácia znázornená na obr. 8 zobrazuje šírenie napätia v oblasti priamo pod guľovým telesom. Dosah šírenia je pomerne nízky, čo súvisí s deformáciou peny a teda i s veľkosťou sily, ktorá túto deformáciu spôsobila. Na farebnej palete sú tieto hodnoty znázornené farebne svetlo až tmavo modrou farbou.



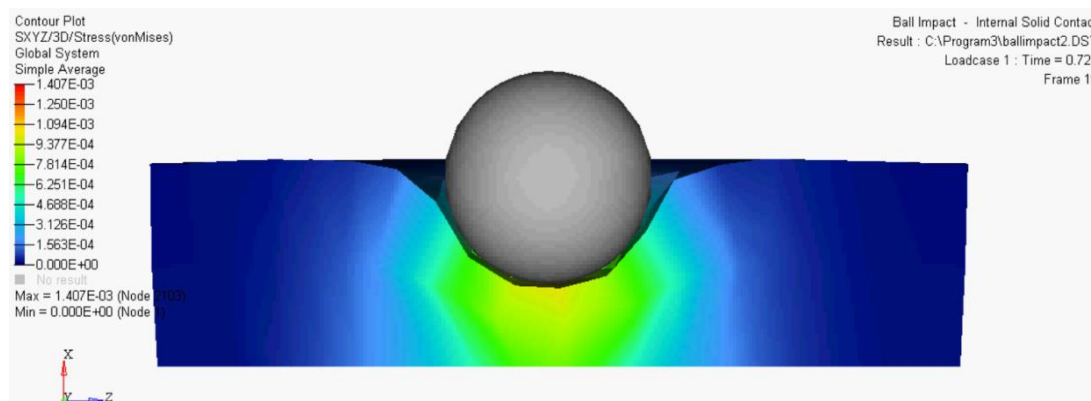
Obr. 8 Napätie z profilu peny pri stlačení 20 %

Na obr. 9 je znázornená simulácia šírenia napätia pri 40 % stlačení, kde napätie zobrazené pod guľovým telesom zvyšovalo nie len svoj dosah ale aj veľkosť napätia. Toto šírenie napätia je znázornené na farebnej palete svetlo zelenou farbou.



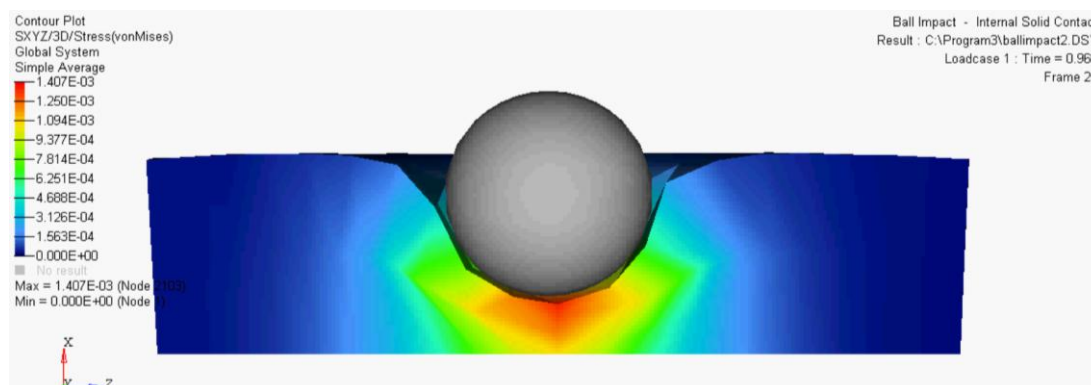
Obr. 9 Napätie z profilu peny pri stlačení 40 %

Zvýšením tlaku pri 60 % stlačení je znázornená na obr. 10. Napätie sa šíri do väčších vzdialeností od zaťažovacieho telesa.



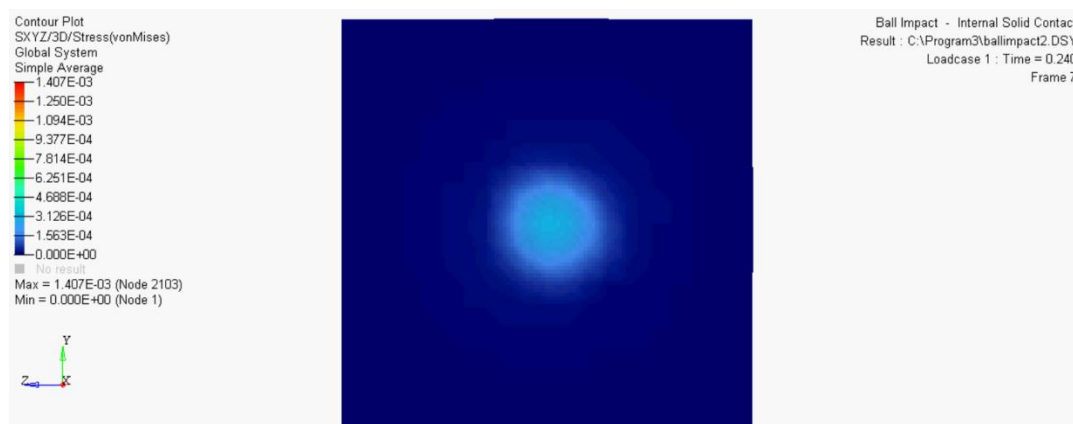
Obr. 10 Napätie z profilu peny pri stlačení 60 %

Na obr. 11 je červenou farbou znázornená maximálna hodnota tlaku pri jej 80 % deformácií. Je zrejmé, že s rastúcou deformáciou rastie aj hodnota napätia, ktoré sa šíri do väčších vzdialeností od zaťažovacieho telesa.

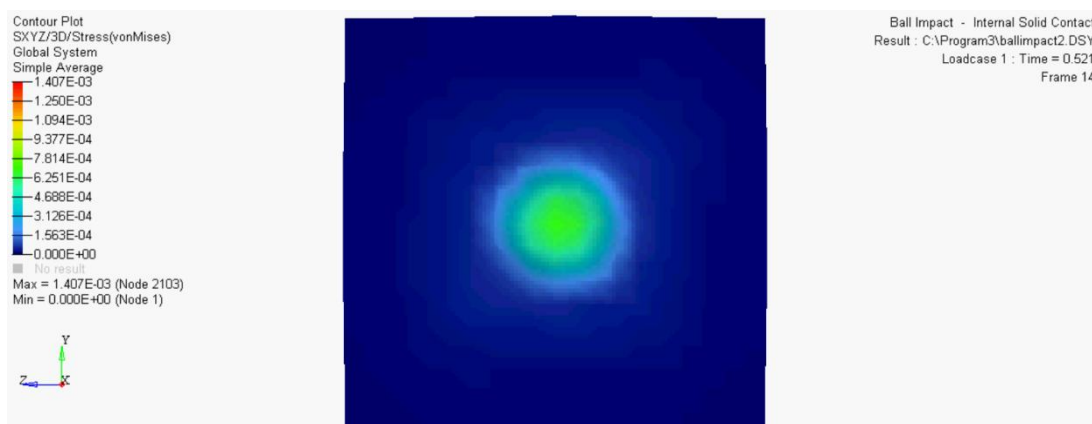


Obr. 11 Napätie z profilu peny pri stlačení 80 %

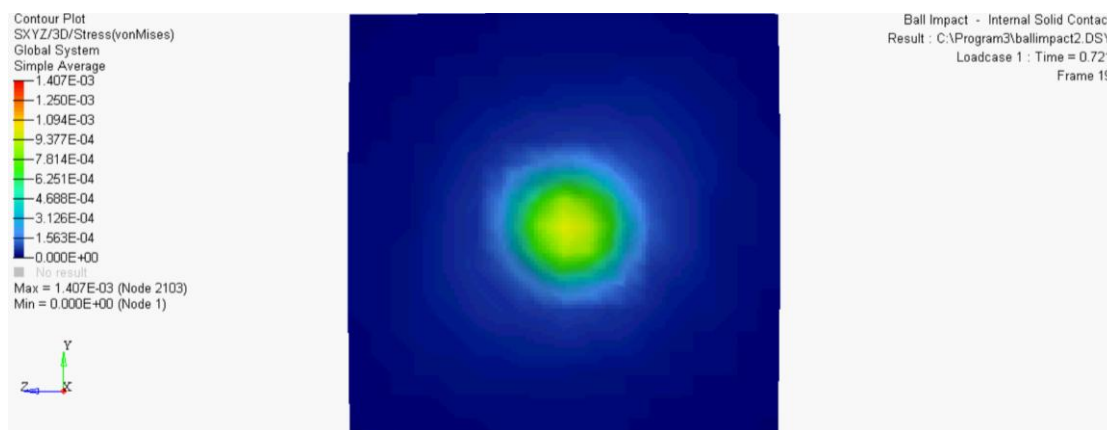
Na obr. 12 až 15 je zobrazený pohľad z hora na horný povrch matraca. Pôsobenie guľového zaťažovacieho telesa bolo v smere osy „x“ kolmo k povrchu polyuretánovej peny. Na obr. 12 až 15 je znázornené šírenie napätia postupne od stredu peny do okolia pomocou izoplôch. Smerom od miesta pôsobenia dochádzalo k postupnému zníženiu napätia, vid'. obr.12.



Obr. 12 Napätie na hornom povrchu peny pri stlačení 20 %

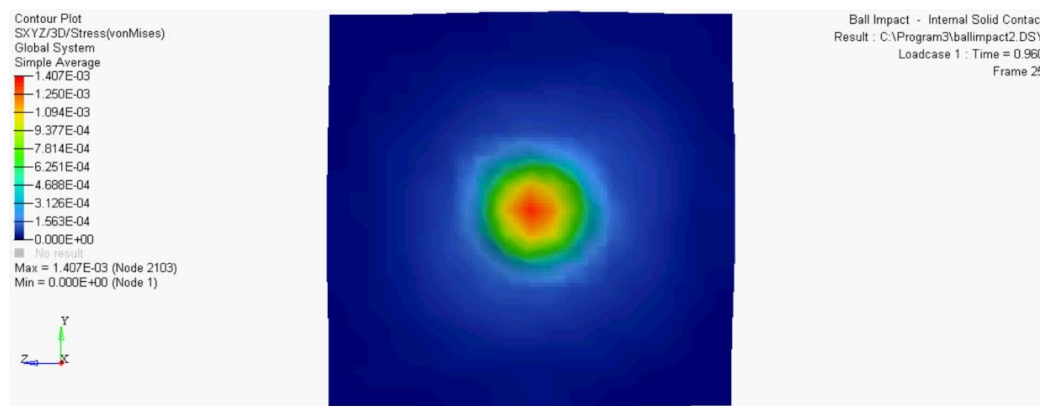


Obr. 13 Napätie na hornom povrchu peny pri stlačení 40 %



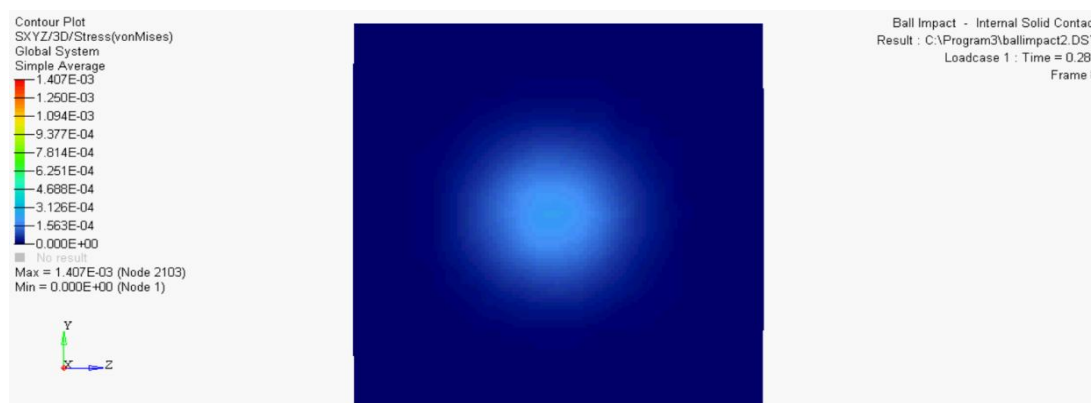
Obr. 14 Napätie pri hornom povrchu peny pri stlačení 60 %

Na obr. 15 je znázornená maximálna dosiahnutá deformácie zobrazená červenou farbou, ktorá je v mieste pôsobenia guľového zaťažovacieho telesa.

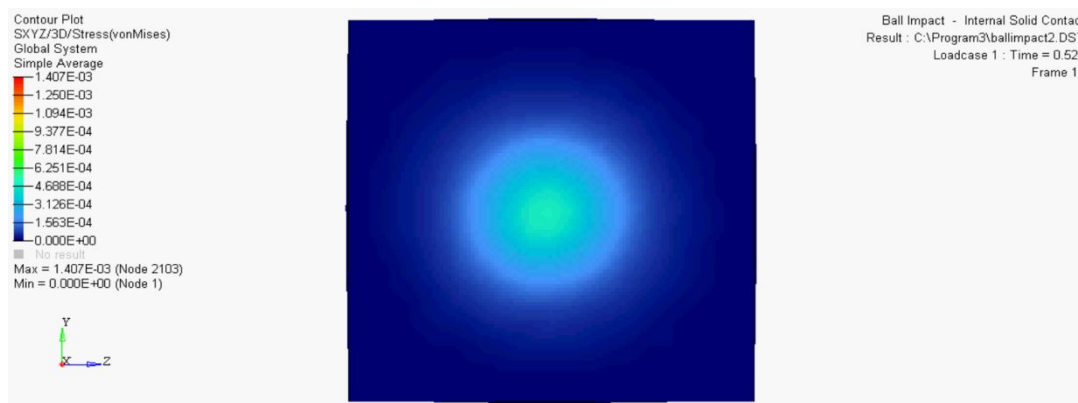


Obr. 15 Napätie pri hornom povrchu peny pri stlačení 80 %

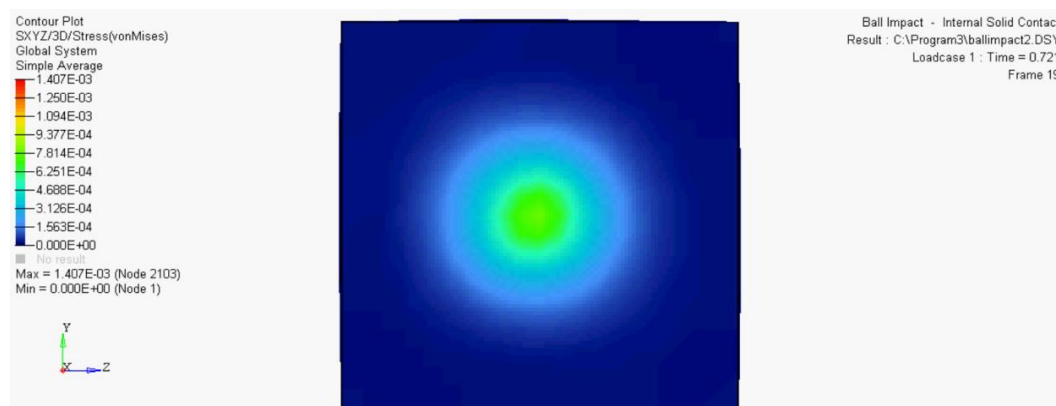
Distribúcia tlaku je patrná nie len pri hornom povrchu, ale aj pri spodnom okraji peny, vid' obr. 16 až 19. Obrázky, na ktorých sú znázornené simulácie zobrazujú pohľad na dolný povrch polyuretánovej peny. Pôsobenie guľového zaťažovacieho telesa bolo v smere osy „x“ kolmo k povrchu PU matraca. Na obr. 16 a 17 je svetlo modrou až tmavo modrou farbou zobrazená nízka hodnota tlaku pri 20 % až 40 % deformácie peny.



Obr. 16 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 20 %

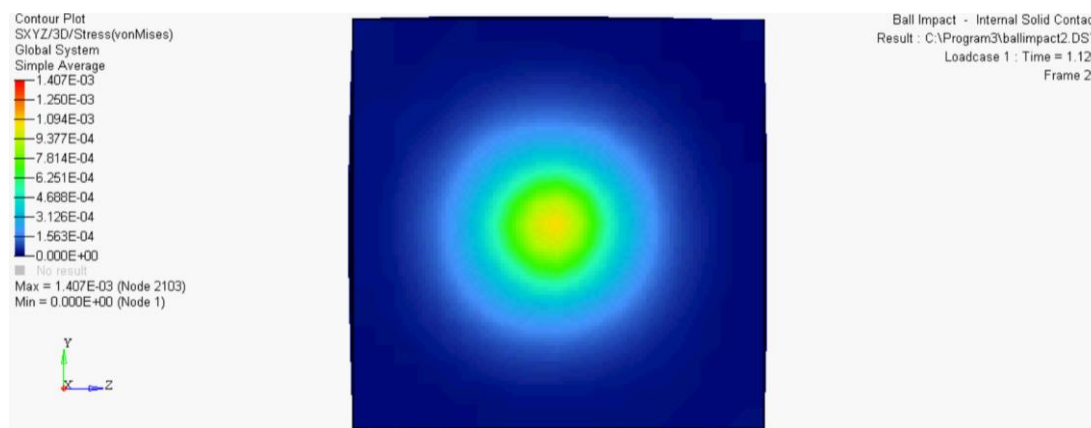


Obr. 17 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 40 %



Obr. 18 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 60 %

Hodnota (koncentrácia) tlaku v polyuretánovej pene bola najintenzívnejšia v strede vzorky t.j., v mieste pôsobenia guľového zaťažovacieho telesa. Napätie pri 80 % deformácií sa šírilo vo väčších vzdialenostiach od pôsobiaceho tlaku, čo možno vidieť zobrazené žltó-oranžovou farbou na obr. 19.



Obr. 19 Napätie pri dolnom povrchu peny pri stlačení 80 %

2.2 Stanovenie hypotézy pre nepriame meranie tlaku

Pri stanovení hypotézy sa vychádza z informácií o šírení tlaku penou, ktoré boli získane pomocou simulácie. Ako zo simulovaných hodnôt vyplýva, (viď. kapitola 2.1), napätia v pene sa bude šíriť v kruhových oblastiach, tzv. izoplochách. Nepriame stanovenie kontaktného tlaku je teda možné pri znalostiach vlastností peny aj mimo priamy kontakt a to stanovením tlaku šíriacim sa penou na vhodne zvolených miestach.

Hypotéza:

Pokiaľ sa napätie šíri dostatočne intenzívne sledovaným útvarom je možné jeho redukované hodnoty stanoviť aj v určitej vzdialenosti od miesta šírenia, teda nie priamo v mieste kontaktu. Ak poznáme vlastnosti použitého útvaru, (napr.: gradient napätie) môžeme z hodnoty nameranej v istej vzdialenosti od telesa usudzovať na veľkosť napätia, ktorá ju spôsobila. Aby bolo možné usudzovať nie len na túto hodnotu, ale tiež na pozíciu zdroja napätia, je vhodné použiť aspoň tri vhodné usporiadané čidla (snímacie zariadenie) napätia resp. sily.

2.3 Vstupné parametre a postup pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku

Pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku boli stanovené výpočtové vzťahy, z ktorých bolo možné určiť polohu zdroja napätia ako aj veľkosť pôsobiaceho tlaku. K tomu boli potrebné nasledujúce kroky:

- *Stanovenie distribúcie tlaku v PU pene experimentálnym meraním*

Distribúciu tlaku v polyuretánovej pene je možno experimentálne stanoviť napr. pomocou vhodne umiestnených tenzometrických snímačov, ktoré určia odozvu materiálu na kompresné namáhanie.

- *Nahradenie experimentálnych hodnôt funkčnou závislosťou*

Namerané (experimentálne) hodnoty distribúcie napätia je nutné nahradiť funkčnou závislosťou. Ta môže byť reprezentovaná napr. vhodne modifikovanou krivkou normálneho rozdelenia. Vhodný priebeh funkcie je možno zaistiť parametrami, ktoré je možné určiť metódou MNČ. Tieto parametre určujú maximum (vrchol) krivky (posuv vzhľadom k súradnému systému) a sklon krivky.

- *Stanovenie polohy pôsobiaceho tlaku pomocou priesečníku kružníc a priesečníka guli*

Polohu pôsobiaceho tlaku je možno stanoviť priesečníkom dvoch kružníc. Ak je známa hodnota na dvoch tenzometrických snímačoch (čidlách), je možno z tejto funkcie stanoviť i vzdialenosť snímača (čidla) od zdroja napätia. V mieste pretínania sa dvoch

kružníc vznikne priesečník určujúci miesto zdroja napätia. Presnejšie určenie priesečníku možno získať nájdením priesečníku troch gúl, kde v tomto prípade budú použité tri tenzometrické snímače. Úlohou je teda nájsť priesečník troch guľových plôch vid' obr. 28. Tento postup je známy ako tzv. trilaterácia.

2.4 Nahradenie nameraných hodnôt distribúcie napätia pomocou funkcie

Pri určovaní funkcie (nelineárnej) potrebnej k stanoveniu kontaktného tlaku nepriamou metódou t.j. výpočtom, bolo možné vychádzať z funkcie normálneho rozdelenia. Táto nelineárna funkcia nahradzuje distribúciu napätia v PU pene.

Normálne (Gaussovo) rozdelenie patrí medzi najdôležitejšie rozdelenie pravdepodobnosti spojitaj náhodnej veličiny. Význam tohto rozdelenia pravdepodobnosti spočíva v dobrej aproximácii radov iných pravdepodobnostných rozdelení (spojité, diskrétne) za určitých podmienok. Normálne rozdelenie pravdepodobnosti s parametrami μ a σ^2 , pre $-\infty < \mu < \infty$ a $\sigma^2 > 0$ je $-\infty < x < \infty$ pre definované hustotou pravdepodobnosti [20].

Rovnica hustoty pravdepodobnosti

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Hustota pravdepodobnosti je daná funkciou $f_{(x)}$ premennej osy x , ktorej grafom je Gaussova krivka. Funkcia je vyjadrená dvoma členmi. Prvý člen funkcie „ $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ “ vyjadruje výšku Gaussovej krivky (maximum funkcie a druhý člen funkcie „ $e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ “ vyjadruje šírku Gaussovej krivky. Parameter σ je smerodajná odchýlka, rozširuje graf a daný integrál (plocha pod krivkou) je násobený číslom „ $\sigma\sqrt{2}$ “, parameter μ je stredná hodnota, ktorá posúva graf po ose x a nemá vplyv na hodnotu integrálu, e je Eulerovo číslo (2,718) [20].

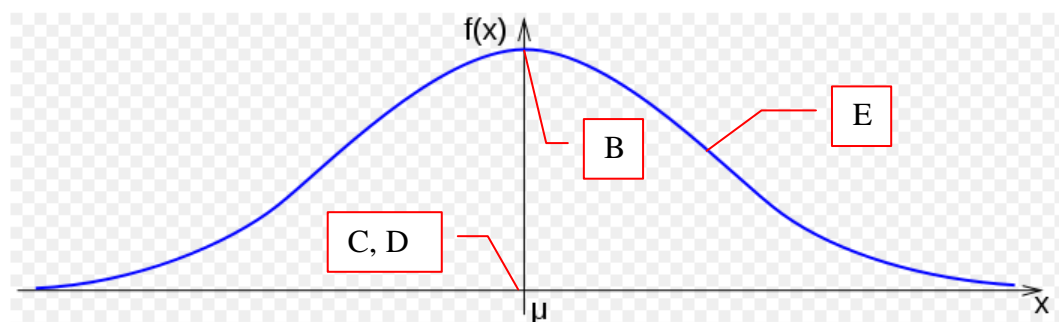
Nelineárna rovnica

$$F = A + B * e^{-\frac{(x-C)^2 + (y-D)^2}{2 * E^2}} \quad (3)$$

Nelineárna rovnica vychádza z rovnice normálneho (Gaussoveho) rozdelenia pravdepodobnosti. S normálnym rozdelením súvisí aj rada chýb a tie je možné riešiť pomocou metódy najmenších štvorcov (MNČ).

$$S = \sum (f(x_i) - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

MNČ je matematicko štatistická metóda určená na riešenie nekompatibilných sústav lineárnych rovníc [21]. Funkcia (vzorec č.3), ktorá vychádza z normálneho rozdelenia má viac vstupných parametrov (A, B, C, D, E). Preto je potrebné upraviť ju na nelineárnu (regresnú) funkciu. Tieto vstupné parametre slúžia k určeniu odhadu parametrov funkcie. Charakteristika parametrov: parameter A umožňuje posuv po ose z a je pevne daný, parameter B udáva výšku Gaussovej krivky (maximum funkcie) uprostred, podľa nameranej hodnoty distribúcie napätia, parametre C, D sú dané ako stred os x_0 , y_0 (μ_x, μ_y stredná hodnota), parameter E je daný ako σ smerodajná odchýlka funkcie a rozširuje (zužuje) graf. Hodnoty sily sú v grafe preložené (fitované) krivkou vid' obr. 20.



Obr. 20 Hustota normálneho rozdelenia pravdepodobnosti [20]

2.5 Stanovenie kontaktného tlaku pomocou priesečníku dvoch kružníc

Kružnica je množina všetkých bodov v rovine v rovnakej vzdialenosti, nazývanej ako polomer a od pevného bodu nazývaného ako stred. Kružnice sú jednoduché uzavreté krivky, ktoré rozdeľujú rovinu na vnútro a vonkajšok [22]. Pomocou dvoch kružníc (vzorce č. 6 a 7) je možné určiť priesečník, ktorý určuje polohu od miesta zdroja pôsobenia na polyuretánový materiál.

Všeobecná rovnica kružnice

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (5)$$

Rovnice kružníc v experimentálnej časti

$$f_1: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (6)$$

$$f_2: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (7)$$

2.6 Stanovenie kontaktného tlaku pomocou priesečníku troch gúlí

Guľa je priestorové teleso vytvorené z množiny všetkých bodov, ktorej vzdialenosť od stredu gule bude rovná alebo menšia než daný polomer. Guľovú plochu je možné určiť pomocou rovnice gule. V analytickej geometrii je guľová plocha so stredom (x_0, y_0, z_0) a jej polomerom r charakterizovaná ako množina bodov (x, y, z) [23]. Pomocou stredov guľových plôch je možné určiť priesečníky zistených vzdialeností troch guľí, tzv. trilateráciou. Tieto priesečníky určia miesto zdroja pôsobiaceho napätia na PU materiál.

Definícia trilaterácie

Trilaterácia je priestorová verzia triangulácie (metóda zisťovania súradníc a vzdialeností). Ak je známa vzdialenosť od troch orientačných bodov (čidiel) umiestnených v priestore, tak je potom možné určiť polohu bodu pomocou kružidla (kružníc). Poloha bodu je presne v mieste pretínania sa (priesečníku) troch kružníc, kde stred týchto kružníc je v mieste referenčných bodov (čidiel). Polomer každej kružnice je daný ako vzdialenosť od referenčného bodu [24].

Všeobecná rovnica gule

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (8)$$

Pomocou troch kvadratických rovníc (9, 10, 11) je možné určiť priesečník troch gúlí, ktorý určuje miesto zdroja napätia.

Rovnice gule v experimentálnej časti

$$f_1: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2 = r^2 \quad (9)$$

$$f_2: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2 = r^2 \quad (10)$$

$$f_3: (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2 = r^2 \quad (11)$$

Grafický postup

Grafické nájdenie priesečníku v programe Matlab. Zobrazenie troch guľových plôch je možné pomocou rovníc napr. v sférických súradniciach. V mieste pretínania sa guľových plôch je možné určiť ich priesečník vid' obr. 21. Tento priesečník určuje miesto zdroja napätia.

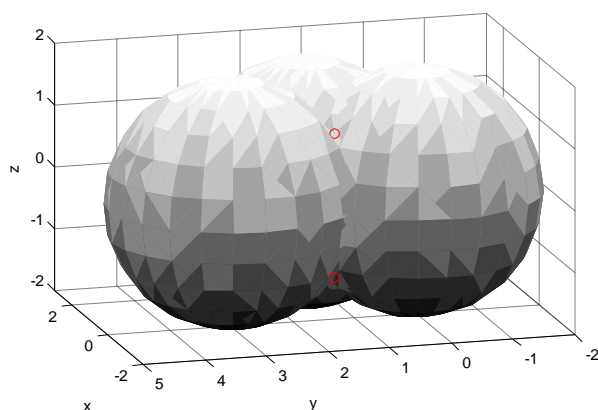
Parametrické vyjadrenie guľovej plochy

$$x = x_0 + r \cos \theta \cos \varphi \quad (12)$$

$$y = y_0 + r \cos \theta \sin \varphi \quad (13)$$

$$z = z_0 + r \sin \theta \quad (14)$$

Kde platí, že: $0 \leq \theta \leq \pi$, $-\pi < \varphi \leq \pi$ [24]



Obr. 21 Priesečník troch guľových plôch

2.6.1 Štatistické charakteristiky

Charakteristiky polohy a variability boli využité pre vyhodnotenie nameraných údajov.

a) *Charakteristika polohy*

Táto poloha udáva stred (úroveň) celej skupiny, okolo ktorej všetky hodnoty kolíšu. *Aritmetický priemer* – je definovaný ako súčet všetkých hodnôt znaku delený ich počtom.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

b) *Charakteristiky variability*

Udáva rozptýlenie (variabilitu) hodnôt okolo zvoleného stredu skupiny.

Rozptyl s^2 – je definovaný ako súčet kvadratických odchýliek od priemeru delený rozsahom výberu zmenšeným o hodnotu 1.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (16)$$

Smerodajná odchýlka s – je daná ako druhá odmocnina z rozptylu a charakterizuje variabilitu (rozptýlenie) od jeho strednej polohy [25].

$$s = \sqrt{s^2} \quad (17)$$

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

3.1 Cieľ experimentu

Cieľom tohto experimentu bolo získanie informácií o vlastnostiach použitých vzoriek pien a následné overenie hypotézy o nepriamom stanovení kontaktného tlaku. Na meranie boli použité tri druhy polyuretánových pien a to vysoko elastické, normálne a viskoelastické. Experiment bol prevádzaný na meracom prístroji LabTest 2.050, ktorý bol doplnený o guľové zaťažovacie teleso a snímacie zariadenie umiestnené v špeciálnom stojane. Namerané hodnoty boli štatisticky spracované.

3.1.1 Použité materiály

V experimente boli použité tri druhy PU pien: vysoko elastické, („studené peny“), normálne a viskoelastické („lenivé peny“) celkom 8 vzoriek vid' príloha 2. Každá z pien mala rozdielnu hustotu, odolnosť proti stlačeniu ako aj pevnosť v tlaku, ktoré sú uvedené nižšie v tab. 1. Peny mali rozmery: 450 x 250 x 50 mm.



Obr. 22 Typy polyuretánových pien

3.1.2 Vybrané vlastnosti a označenie vzoriek PU pien

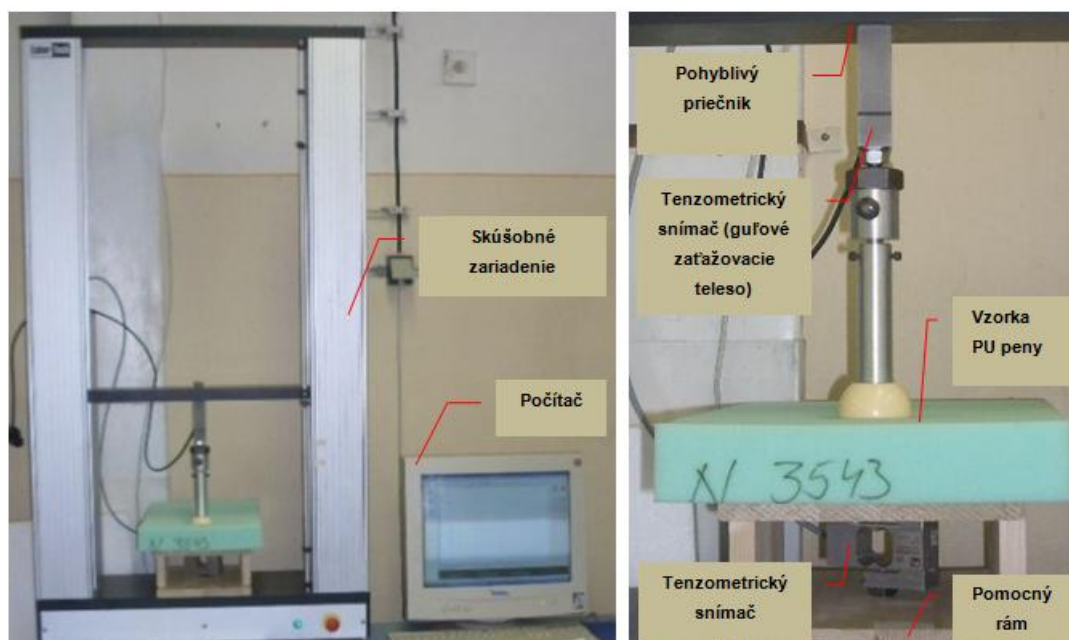
V tejto tabuľke sú uvedené vlastnosti polyuretánových pien a to hustota, napätie v tlaku, pevnosť v tlaku a taktiež aj označenie, farba a typy jednotlivých pien.

Tab. 1 Vlastnosti PU pien

Označenie PU peny	Farba PU peny	Typ peny	Hustota [kg/m ³]	Napätie v tlaku [kPa] (pri 40% stlačení)	Pevnosť v tlaku [kPa]
R 4036	Svetlo oranžová	Vysoko elastické peny („studené“)	40	3,6	80
R 4535	Svetlo zelená		45	3,5	100
R 4542	Zelená		45	4,2	100
N 3543	Svetlo zelená	Normálne Peny	35	4,3	110
N 4050	Svetlo modrá		40	5,0	120
N 5063	Svetlo ružová		50	6,3	130
V 5020	Svetlo žltá	Viskoelastické peny („lenivé“)	50	2,0	/
V 5025	Svetlo ružová		50	2,5	/

3.1.3 Použité meracie zariadenie

Experiment bol realizovaný na univerzálnom skúšobnom zariadení LabTest 2.050. Guľové teleso s priemerom 52 mm, ktoré slúžilo k zaťažovaniu peny bolo upevnené na tenzometrickom snímači. Druhý tenzometrický snímač s najväčšou zaťažiteľnosťou 50 N bol umiestnený v stojane a zaznamenával silu prenášanou stlačenou penou. Tieto údaje boli zaznamenávané počítačom pripojenom k skúšobnému zariadeniu. Údaje boli spracované graficky ako aj štatisticky vyhodnotené. Usporiadanie experimentu a detail skúšobného zariadenia je uvedené na obr. 23 a 24.



Obr. 23 Skúšobné zariadenie LabTest 2.050 doplnené o detailný popis



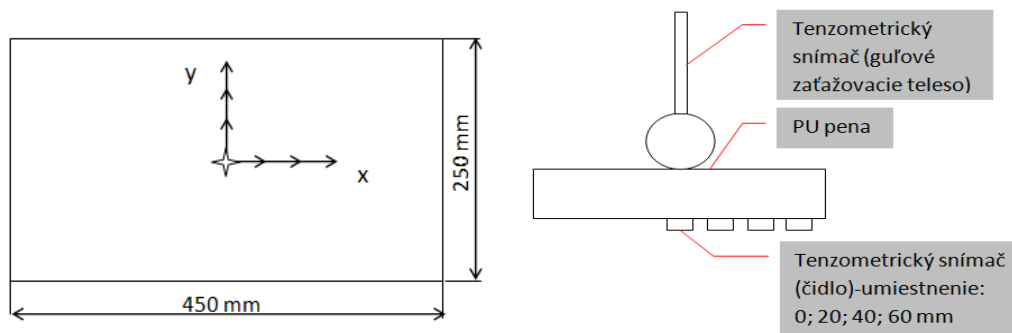
Obr. 24 Detail tenzometrického snímača umiestneného v stojane

3.2 Popis experimentu

Vzorka polyuretánovej peny bola zaťažovaná pomocou guľového zaťažovacieho telesa, ktoré bolo vtlačované do jeho horného povrchu. Zároveň bola snímaná hodnota sily, ktorá bola merateľná vďaka distribúcií napätia v PU pene. Teleso sa pohybovalo v zvislom smere kolmo k povrchu peny rýchlosťou 100 mm/min, až kým dosiahlo 80 % deformácie peny, čo odpovedá deformácii vzhľadom k hrúbke vzorky 40 mm. Pretože PU pena vykazuje značnú relaxáciu napätia, je nutné merať silovú odozvu materiálu až po určitej dobe od zaťaženia. Preto bola sila meraná až po uplynutí 300 sekúnd od počiatku zaťaženia. Aby bolo možné stanoviť distribúciu napätia v pene, bolo pri snímaní sily postupované nasledujúcim spôsobom.

Postup merania

Meranie prebiehalo určením stredu vzorky, ktorý sa umiestnil priamo na spodný tenzometrický snímač (čidlo). Po zaťažení a relaxácii boli zaznamenané zistené hodnoty sily. Potom sa zaťažovacie teleso posunulo v smere osy „x“ o 20 mm a celý postup merania sa zopakoval. Podobne sa postupovalo aj pre vzdialenosť 40 a 60 mm a tiež v smere osy „y“. Každé meranie prebiehalo celkom 5-krát a bolo štatisticky spracované t.j., doplnené o priemer \bar{F} a smerodajnú odchýlku. Hodnoty sú uvedené v tab. 3 – 5.



Obr. 25 Vzorka PU peny a) pohľad z povrchu vzorky b) profilový pohľad na vzorku

V tabuľke 2 sú uvedené typy polyuretánových pien s ich priemernými hodnotami síl pri 80 % deformácií a smerodajnými odchýlkami. Tieto hodnoty síly boli zaznamenávané z hora pomocou tenzometrického snímača (gul'ového zaťažovacieho telesa), umiestneného v ramene meracieho prístroja.

Tab. 2 Priemerné hodnoty síly PU pien pri stlačení na 80% deformáciu

Typ peny		
Označenie peny	\bar{F}	S
R 4036	43,364	0,505
R 4535	45,232	0,833
R 4543	54,478	0,415
N 3543	47,708	0,752
N 4050	49,521	0,854
N 5063	84,979	0,526
V 5020	17,303	0,653
V 5025	20,302	0,985

Tab. 3 Priemerné hodnoty síly vysoko elastických PU pien pri stlačení na 80% deformáciu

Vysoko elastická PU pena							
Priemerné hodnoty síly F [N] a smerodajná odchýlka							
Os	Vzdialenosť [mm]	R 4036		R 4535		R 4542	
		\bar{F}	S	\bar{F}	S	\bar{F}	S
x	0	1,242	0,032	1,334	0,027	2,335	0,043
	20	0,781	0,028	0,675	0,038	1,044	0,036
	40	0,402	0,020	0,220	0,033	0,402	0,033
	60	0,362	0,031	0,190	0,037	0,391	0,038
y	0	1,242	0,032	1,334	0,027	2,335	0,043
	20	0,829	0,029	0,553	0,034	0,957	0,042
	40	0,384	0,036	0,207	0,026	0,434	0,032
	60	0,335	0,024	0,173	0,035	0,364	0,031

Tab. 4 Priemerné hodnoty sily normálnych PU pien pri stlačení na 80% deformáciu

Normálna PU pena							
Priemerné hodnoty sily F [N] a smerodajná odchýlka vzoriek							
Os	Vzdialenosť [mm]	N 3543		N 4050		N 5063	
		\bar{F}	S	\bar{F}	S	\bar{F}	S
x	0	0,891	0,034	1,323	0,031	2,472	0,028
	20	0,611	0,032	0,485	0,036	1,445	0,031
	40	0,337	0,028	0,276	0,033	0,581	0,033
	60	0,326	0,031	0,270	0,029	0,510	0,037
y	0	0,891	0,034	1,323	0,031	2,472	0,028
	20	0,657	0,032	0,474	0,034	1,082	0,032
	40	0,349	0,039	0,269	0,025	0,492	0,036
	60	0,340	0,031	0,249	0,031	0,446	0,031

Tab. 5 Priemerné hodnoty sily viskoelastických PU pien pri stlačení na 80% deformáciu

Viskoelastická PU pena					
Priemerné hodnoty sily F [N] a smerodajná odchýlka vzoriek					
Os	Vzdialenosť [mm]	V 5020		V 5025	
		\bar{F}	S	\bar{F}	S
x	0	0,487	0,031	0,863	0,029
	20	0,162	0,029	0,286	0,032
	40	0,068	0,034	0,094	0,033
	60	0,055	0,032	0,078	0,030
y	0	0,487	0,031	0,863	0,029
	20	0,159	0,035	0,332	0,031
	40	0,075	0,032	0,106	0,036
	60	0,073	0,036	0,085	0,027

3.3 Príklad výpočtu pre nepriame stanovenie kontaktného tlaku

Na príklade vid' nižšie, je uvedený postup výpočtu pomocou experimentálne stanovených odoziev síl, ktoré boli na silomerných (tenzometrických) snímačoch. Hodnoty sú stanovené na vzorke peny R 4036, poloha zaťažovacieho telesa bola [20,9; 23,83] a hodnota deformácie peny bola 80 %. Aplikované postupy boli uvedené v kap. 3.3.1 až 3.3.3. Na nepriame stanovenie kontaktného tlaku bol použitý program Matlab, v ktorom boli spracované a vyhodnotené experimentálne hodnoty. Distribučnou

funkciou bolo možné určiť vzdialenosti čidiel od zdroja napätia pomocou určených odoziev síl z 2 čidiel v prípade kružníc a z 3 čidiel v prípade gúl. Pomocou nameraných hodnôt a vzťahov uvedených v kapitole 2.4 až 2.6 bolo možné stanoviť miesto zdroja napätia z priesečníku dvoch kružníc a priesečníku troch gúl. Tento priesečník bol určený pomocou zistených vzdialeností polomerov dvoch kružníc a troch guľových plôch vid' príloha 3.

3.3.1 Určenie funkcie distribúcie napätia PU pien

Tvar lineárnej funkcie ako aj význam jednotlivých parametrov je popísaný v kap. 2.4.

$$F = A + B * e^{-\frac{(x-C)^2 + (y-D)^2}{2 * E^2}}$$

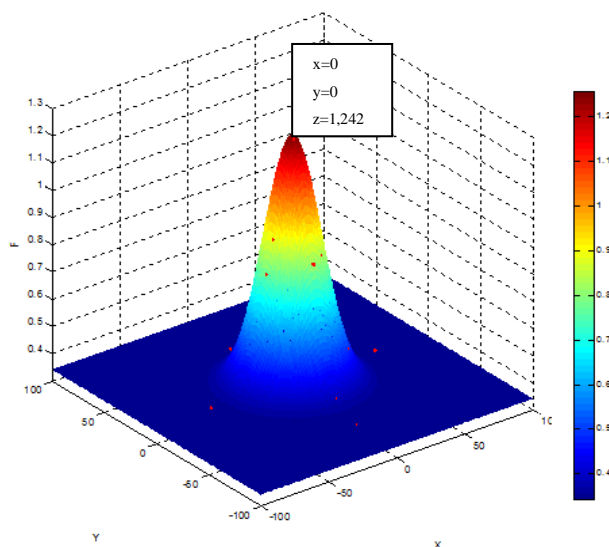
Pre odhad tejto funkcie boli použité nasledujúce vstupné parametre:

A = 0; B = 1,242; C = 0; D = 0; E = 20.

Výsledky odhadov parametrov funkcie pomocou programu Matlab:

A = 0,3424 B = 0,9149 C = 0 D = 0 E = 17,0998

Na základe silovej odozvy nameranej na troch tenzometrických snímačov (čidiel) so súradnicami [0; 0], [60; 0]; [0; 60] umiestnených v rovine, je možné stanoviť vzdialenosť troch čidiel od zdroja napätia. Túto vzdialenosť je možné určiť funkciou distribúcie napätia študovanej peny vid' obr. 26, ak sú známe odozvy na týchto čidlách. Rovnakým spôsobom ako bolo ukázané vyššie boli určené parametre distribučnej funkcie aj pre ostatné vzorky pien pri hodnote deformácie 80 %. Tieto hodnoty sú uvedené v tab. 6.



Obr. 26 Grafické znázornenie distribučnej funkcie vzorky peny R 4036

Tab. 6 Odhad parametrov distribučnej funkcie pri 80 % deformácií pien

Odhad parametrov funkcie distribúcie napätia v programe Matlab					
Typ peny	A	B	C	D	E
R 4036	0,3424	0,9149	0		17,0998
R 4535	0,1847	1,1527			14,2100
R 4542	0,3872	1,9356			13,2018
N 3543	0,3174	0,5953			17,5526
N 4050	0,2615	1,0519			11,2749
N 5063	0,4838	1,9691			14,6982
V 5020	0,0649	0,4076			11,6920
V 5025	0,0891	0,7637			12,6526

3.3.2 Určenie polohy zdroja napätia pomocou priesečníku dvoch kružníc

Polohu distribúcie napätia polyuretánovej peny je možné určiť troma spôsobmi a to pomocou priesečníku dvoch kružníc, priesečníku troch gúl a parametrickým vyjadrením guľových plôch. Najprv bolo ľubovoľne zvolené miesto pôsobiska zaťažovacej sily a potom zmerané silové odozvy na príslušných čidlách vid' kap. 2.5)

Namerané odozvy síl F_{z1} , F_{z2} , F_{z3} boli:

$$F_{z1} = 0,5012 \text{ N}$$

$$F_{z2} = 0,3669 \text{ N}$$

$$F_{z3} = 0,3872 \text{ N}$$

Určenie vzdialenosti (polomeru) troch tenzometrických snímačov od zdroja napätia

Najprv boli použité sily stanovené čidlami 1 a 2. Z nich bolo možné určiť vzdialenosť.

$$F_1 = 0,3424 + 0,9149 * e^{-\frac{r^2}{2 * 17,0998^2}}$$

$$r = -\sigma * \sqrt{(2 * \ln * \frac{F_{z1}-A}{B})} \Rightarrow r = -17,0998 * \sqrt{(2 * \ln * \frac{0,5012-0,3424}{0,9149})}$$

$$r_1 = \underline{32 \text{ mm}}$$

$$F_2 = 0,3424 + 0,9149 * e^{-\frac{r^2}{2 * 17,0998^2}}$$

$$r = -\sigma * \sqrt{(2 * \ln * \frac{F_{z2}-A}{B})} \Rightarrow r = -17,0998 * \sqrt{(2 * \ln * \frac{0,3669-0,3424}{0,9149})}$$

$$r_2 = \underline{46 \text{ mm}}$$

$$F_3 = 0,3424 + 0,9149 * e^{-\frac{r^2}{2 * 17,0998^2}}$$

$$r = -\sigma * \sqrt{(2 * \ln * \frac{F_{z3}-A}{B})} \Rightarrow r = -17,0998 * \sqrt{(2 * \ln * \frac{0,3872-0,3424}{0,9149})}$$

$$r_3 = \underline{42 \text{ mm}}$$

Získanými vzdialenosťami (r_1 a r_2) z funkcie distribúcie napätia je možné určiť miesto zdroja napätia pomocou dvoch pretínajúcich sa kružníc. V mieste, kde dôjde k pretínaniu sa dvoch kružníc vznikne priesečník. Ten určuje miesto zdroja napätia.

Rovnice kružníc so súradnicami $[x_0, y_0]$

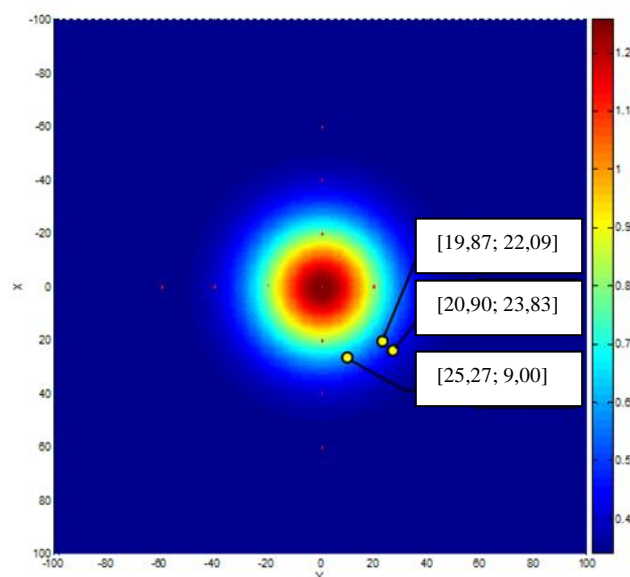
$$f_1 = (x - 0)^2 + (y - 0)^2 = 32^2 \quad [0, 0]$$

$$f_2 = (x - 60)^2 + (y - 0)^2 = 46^2 \quad [60, 0]$$

Výpočet polohy pomocou dvoch kružníc:

$$x = 20,90$$

$$y = 23,83$$



Obr. 27 Grafické znázornenie vzorky R 4036 so súradnicami (pohľad z povrch peny)

Súradnice polohy zaťažovacieho telesa vzorky R 4036: [20,90; 23,83], [25,27; 9,00], [19,87; 22,09], vid' obr. 27 a tab. 7.

3.3.3 Určenie polohy zdroja napätia pomocou priesečníku troch gulí

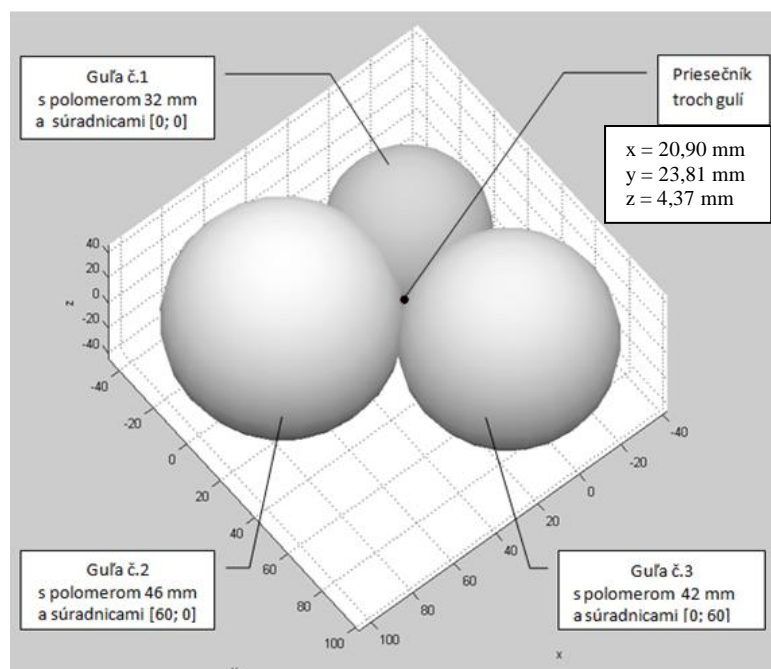
Riešením sústavy troch kvadratických rovníc

Distribúciu napätia polyuretánovej peny bolo možné stanoviť aj druhým spôsobom a to pomocou priesečníku troch gulí vid' kap. 2.6. Táto metóda ako v predchádzajúcom prípade kap. 3.3.2, pozostávala z určenia polohy zdroja napätia pomocou získaných polomerov (r_1 , r_2 , r_3) vid' kap. 3.3.1. Tieto polomery udávajú vzdialenosť troch čidiel od zdroja napätia. Pomocou určených vzdialeností (polomerov) bolo možné určiť miesto pretínania sa troch gulí. Toto miesto určuje polohu zdroja napätia pomocou získaných súradníc: $x = 20,90$; $y = 23,83$; $z = 4,37$ mm.

Grafickým nájdením priesečníku

Poslednou z metód, pomocou ktorej bola určená poloha priesečníku, bola metóda parametrického zobrazenia guľových plôch vid' kap. 2.6. Opäť bolo potrebné stanoviť vzdialeností troch tenzometrických snímačov (čidiel) od miesta zdroja napätia. Pomocou čidiel so súradnicami [0; 0], [60; 0]; [0; 60] bolo možné určiť odozvy síl

($F_{z1} = 0,5012 \text{ N}$; $F_{z2} = 0,3669 \text{ N}$; $F_{z3} = 0,3872 \text{ N}$). Na základe týchto odoziev síl boli určené polomery vychádzajúce z funkcie distribúcie napätia vid' kap. 3.3.1. Pomocou polomerov guľových plôch so vzdialenosťami ($r_1 = 32$; $r_2 = 46$; $r_3 = 42 \text{ mm}$), ktorých stredy boli v jednej rovine, bol určený priesečník. Tento priesečník sa nachádzal nad touto rovinou. V mieste pretínania sa guľových plôch sa nachádza miesto zdroja napätia vid' obr. 28.



Obr. 28 Grafické znázornenie priesečníku troch guľí

3.4 Výsledky experimentálnych a nameraných hodnôt polohy zdroja napätia

V tabuľkách 7 - 9 sú uvedené zistené vzdialenosti polomerov guľových plôch stanovených distribúciou zo znalosti silovej odozvy. Pomocou nich bol následne určený priesečník troch guľí. Tento priesečník určuje miesto pôsobenia zdroja napätia. Tiež boli určené priesečníky dvoch kružníc, ktoré sa však chovali podobne. Tabuľky sú rozdelené podľa typu použitých pien, teda na peny vysoko elastické „studené“, normálne a viskoelastické „lenivé“ peny, polomery (vzdialenosti) troch čidiel od miesta zdroja napätia pomocou priesečníku troch guľí, ktoré udávali väčšiu presnosť než priesečníkom dvoch kružníc. Ďalej sú uvedené experimentálne a namerané hodnoty polohy miesta zdroja napätia.

Tab. 7 Vzdialenosť čidiel a poloha zdroja napätia u vysoko elastických PU pien

	Polomery troch gúl			Experimentálne hodnoty polohy		Namerané hodnoty polohy	
Typy pien	r_1	r_2	r_3	x	y	X	Y
R 4036	32	46	42	20,90	23,83	21	24
	27	36	57	25,27	9,00	25	9
	30	46	43	19,87	22,09	20	22
R 4535	39	52	34	20,14	33,04	20	33
	34	45	42	22,76	24,93	23	25
	33	33	56	30,00	12,94	30	13
R 4542	34	37	50	28,23	18,86	28	19
	34	49	38	19,63	27,60	20	28
	39	50	36	21,84	31,88	22	32

Tab. 8 Vzdialenosť čidiel a poloha zdroja napätia u normálnych pien

	Polomery troch gúl			Experimentálne hodnoty polohy		Namerané hodnoty polohy	
Typy pien	r_1	r_2	r_3	x	y	X	Y
N 3543	27	38	54	24,04	11,78	24	12
	26	50	42	14,80	20,93	15	21
	31	37	52	26,60	15,48	27	15
N 4050	31	38	51	25,98	16,33	26	16
	30	39	50	24,82	16,67	25	17
	35	42	45	25,51	23,30	26	23
N 5063	30	51	38	15,82	25,47	16	25
	29	56	35	10,88	26,85	11	27
	33	53	35	15,67	28,87	16	29

Tab. 9 Vzdialenosť čidiel a poloha zdroja napätia u viskoelastických pien

	Polomery troch gúl			Experimentálne hodnoty polohy		Namerané hodnoty polohy	
Typy pien	r_1	r_2	r_3	x	y	x	Y
V 5020	39	48	38	23,48	30,64	24	31
	34	50	37	18,80	28,23	19	28
	29	38	52	24,98	14,47	25	15
V 5025	29	41	49	23,00	17,00	23	17
	38	45	41	25,16	28,02	25	28
	30	47	42	19,09	22,80	19	23

Na povrch každej peny („V“, „N“, „R“) bolo ľubovoľne umiestnené guľového zaťažovacieho teleso a daná vzdialenosť bola odmeraná vzhľadom k jednotlivým

tenzometrickým snímačom. Hodnoty tejto polohy boli určené pre porovnanie údajov polohy získaných výpočtom a boli uvedené v tab. 6 – 8 spolu s výsledkami jednotlivých priesečníkov guli.

4 DISKUSIA

V práci bol navrhnutý a experimentálne overený postup stanovenia kontaktného tlaku nepriamym spôsobom. Tento postup vychádza zo skutočnosti, že PU penou sa napätie šíri do určitej vzdialenosti od zdroja napätia. Túto odozvu možno teda merať v určitej vzdialenosti od nej a ak sú známe mechanické vlastnosti peny, je možné usudzovať na veľkosť zdroja napätia aj na miesto, v ktorom pôsobí. Vychádza z hypotézy vid' kap. 2.2. V experimente boli použité tri typy polyuretánových pien a to: vysoko elastické, normálne a viskoelastické (celkom 8 vzoriek), ktoré sa používajú pre výrobu antidekubitných pomôcok. Vzorka polyuretánovej peny bola umiestnená na tenzometrickom snímači (čidle), ktorý bol špeciálnom v stojane. Po stlačení peny na požadovanú hodnotu deformácie (80 %), bola meraná silová odozva peny na opačnej strane peny. Stred peny sa nachádzal pod pôdorysom stredu gule, odozva na spodnej strane sa merala priamo v tomto strede a potom vo vzdialenosti 20, 40, 60 mm od neho vid' obr. 25.

Vhodne zvolenou funkciou distribúcie napätia, bolo možné namerané hodnoty sily preložiť krivkou, ktorá popisuje túto závislosť vid' kap. 2.4. Zaťažovacie distribučné krivky napätia vysoko elastických „R“, normálnych „N“ a viskoelastických „V“ pien vykazovali rozdielne chovanie v závislosti na ich mechanických vlastnostiach. Všeobecne sa vysoko elastické peny vyznačujú vyššou pružnosťou, normálne peny vyššou pevnosťou a viskoelastické mäkkosťou, teda nižším odporom voči stlačeniu. Väčší odpor voči stlačeniu vykazovali vysoko elastické a normálne peny vid' kap 3.2. Všetky tieto peny sa chovali v závislosti na rozdielnej štruktúre, hustote, napätí v tlaku atď. Distribučnou funkciou napätia v PU pene, bolo možné určiť vzdialenosť čidiel od zdroja napätia, avšak bez znalosti smeru pôsobenia a teda presnej polohy zdroja napätia. Miesto zdroja napätia bolo možné určiť tromi navrhnutými spôsobmi: pomocou

priesečníku dvoch kružníc vid' kap. 2.5, výpočtom priesečníka troch guľových plôch vid' kap. 2.6 alebo z geometrického priesečníku vytvoreného v programe Matlab.

Prvý spôsob: Priesečník kružníc

Pomocou dvoch tenzometrických snímačov (čidiel) so známym usporiadaním, bolo možné určiť odozvy síl pôsobiaceho tlaku. Distribučnou funkciou napätia boli zistené vzdialenosti (polomery) od zdroja napätia. Pomocou priesečníku dvoch kružníc bolo možné určiť miesto zdroja napätia. Presnosť stanovenia priesečníku je závislá na presnosti odpočítania síl zo silomerných snímačov, je možné dôjsť k dvom rôznym výsledkom priesečníka, pretože tie možno získať jak z čidiel ležiacich na ose x , tak aj na ose y , pričom nie je možné rozhodnúť, ktorý z výsledkov je správny či presnejší. Preto bol navrhnutý spresnený postup výpočtu, tzv. trilaterácia.

Druhý spôsob: Priesečník guľí - trilaterácia

Pri tomto postupe sa obdobne ako v predchádzajúcom prípade stanovili vzdialenosti čidiel od zdroja napätia. Tieto vzdialenosti predstavujú polomery guľových plôch, ktorých stredy ležia v miestach silomerných snímačov. Priesečník troch guľových plôch potom opäť určuje miesto pôsobiaceho napätia. V tomto prípade je riešený priestorový problém, preto je potrebné použiť aj údaje z tretieho snímača, ktorý je zároveň spresňujúcim údajom. Výsledkom sú dve trojice súradníc, pričom sa líšia len v opačnej hodnote súradnice z , ktorý je však pre výpočet irelevantný a teda nadbytočný. Hľadaným priesečníkom je preto pôdorysný priemet priesečníku do roviny, v ktorej ležia stredy kružníc, resp. meracie čidla. Pokiaľ by boli guľové plochy nahradené napr. rotačnými paraboloidami a ich tvar by zohľadňoval priamo distribučnú krivku skúmaného útvaru, bolo by možno stanoviť nie len priesečník, ale tiež hodnotu tlaku bez ďalšieho výpočtu.

Tretí spôsob: Parametrické vyjadrenie guľových plôch

Aj v tomto prípade bolo potrebné určiť vzdialenosti čidiel od zdroja napätia pomocou funkcie distribúcie napätia. Priesečník, t.j., miesto kde došlo k pretínaniu sa troch guľových plôch, ktorý je umiestnený nad rovinou, určuje miesto zdroja napätia vid' obr. 28.

Porovnanie stanovenej polohy experimentálne a meraním

Experiment tejto práce pozostával z overenia navrhnutých postupov výpočtu polohy, resp. kontaktného tlaku nepriamou metódou. Najprv bola určená distribučná funkcia napätia jednotlivých vzoriek pien. Pomocou nej a na základe zistených odoziev síl na čidlách bolo možné navrhnutými postupmi stanoviť vzdialenosť čidiel od zdroja napätia. Prvým postupom bolo stanovenie priesečníka dvoch kružníc, druhým priesečník troch guľí stanovený výpočtom a tretí graficky. Experiment spočíval v zaťažovaní peny guľou v ľubovoľnom mieste. Vzdialenosť gule bola odmeraná pre následné porovnanie s navrhnutými postupmi určenia polohy. Na jednotlivých čidlách boli zaznamenané hodnoty sily pôsobiaceho tlaku. Porovnaním metódy meraním a výpočtom je zrejmé, že jednotlivé polohy boli experimentálne určené podobne alebo len s malými odchýlkami vid' tab. 7 - 9.

Možno teda konštatovať, že navrhnutou metódou je možné určiť pomerne presne miesto pôsobiacej sily, resp. kontaktný tlak.

5 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá návrhom systému pre inteligentné matrace pre prevenciu preležanín. Snahou antidekubitných matracov je predchádzať vzniku preležanín, ktoré vznikajú na citlivých častiach tela pacientov. Na výrobu týchto matracov sa prevažne používajú polyuretánové peny kvôli ich dobrým mechanickým vlastnostiam.

Pomocou simulácie distribúcie napätia v PU pene, bolo možné vidieť šírenie napätia v pene a v okolí miesta zdroja napätia. Na základe výsledkov simulácie bola stanovená hypotéza s návrhom postupu nepriameho určenia kontaktného tlaku, čo bolo aj cieľom tejto práce. Keďže priebeh krivky distribúcie napätia svojím tvarom pripomína Gaussovo rozdelenie, bola distribučná funkcia napätia hľadaná v tejto forme. Priebeh krivky vychádzal z experimentálnych hodnôt a zaistenie jej vhodného priebehu bolo korigované 5 parametrami (A, B, C, D, E), ktoré boli hľadané pomocou MNČ (pomocou programu Matlab). Každá pena má túto krivku jedinečnú a to aj vzhľadom k hodnote deformácie peny.

V tejto práci boli použité tri druhy polyuretánových pien. Meranie distribúcie napätia prebiehalo pomocou tenzometrických snímačov umiestnených na skúšobnom zariadení. Vzhľadom k tomu, že experiment bol použitý len pre overenie navrhnutých vzťahov, bola zvolená len jedna hodnota deformácie pri zaťažovaní peny a to hodnota 80 %.

K určeniu silovej odozvy peny a následnému určeniu polohy zdroja napätia boli použité tri vhodne usporiadané tenzometrické snímače (čidla). Pomocou nich bolo možné určiť odozvy síl pôsobiaceho tlaku. Z funkcie distribúcie napätia boli určené vzdialenosti troch čidiel od zdroja pôsobenia. Pre stanovenie polohy zdroja napätia boli navrhnuté 3 metódy.

Pomocou odoziev síl na dvoch čidlách bolo možné stanoviť vzdialenosti (polomery) od zdroja napätia. Tieto vzdialenosti odpovedajú polomerom kružníc, ktorých priesečník bol hľadaný. Pre spresnenie stanovenia priesečníku boli použité metódy určenia pomocou priesečníku troch gúl.

Tak ako v predchádzajúcom prípade, aj tu bolo potrebné určiť odozvy síl z čidiel no v tomto prípade z troch čidiel. Pomocou distribučnej funkcie napätia boli určené

vzdialenosti čidiel od zdroja napätia. Priesečník, ktorý vznikol pretínaním sa troch gúl určuje miesto zdroja napätia.

Tretím spôsobom bolo určenie priesečníku nájdením priesečníku troch gúl graficky. Opäť bolo potrebné stanoviť vzdialenosti čidiel na základe zistených odoziev síl pomocou funkcie distribúcie napätia. V mieste pretínania sa troch guľových plôch vznikol priesečník, ktorý určuje miesto zdroja napätia.

V závere tejto práce by bolo dobré podotknúť, že metódy stanovenia kontaktného tlaku nepriamym spôsobom môžu byť využiteľné v praxi. V budúcnosti by bolo možné použitie týchto metód pomocou viacerých čidiel umiestených pod matracom a monitorovať tak tlak v celej zaťaženej ploche matraca.

6 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] PRESSURE SORES [online] : Batten Disease Support and Research, 2002
[cit. 2010-11-05]. Dostupné z WWW:
<<http://www.bdsra.org/media/content/206/Pressure%20Sores.pdf>>.
- [2] Guide to Bedsores [online] : [cit. 2010-11-05]. Dostupné z WWW:
<<http://www.simpsonmillar.biz/downloads/guides/medical/guide-to-bed-sores.pdf>>.
- [3] MIKULA, J; MULLEROVÁ, N. : Prevence dekubitů. Praha : Grada publishing, a.s., 2008.
- [4] Pasivní matrace [online] : [cit. 2010-11-08]. Dostupné z WWW:
<<http://www.linnet.cz/zdravotnicka-technika/o-spolecnosti/casopis-komfort/komfort-4-2004/26841/pasivni-matrace-atidekubitni>>.
- [5] MLEZIVA, J. : Polymery - výroba, vlastnosti a použití. Praha : Sobotáles, 1993.
- [6] [cit. 2011-01-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.kalias.sk/menu41.htm>>.
- [7] Polyurethane [online] : [cit. 2011-01-07]. Dostupné z WWW:
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyurethane>>.
- [8] HEPBURN, C.: Polyurethane Elastomers. London : Applied Science, 1992.
- [9] ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o makromolekulárních materiálech, syntetické polymery, jejich výroba, struktura a vlastnosti. Brno, 1968.
- [10] HERRINGTON, R.; HOCK, K.: Flexible Polyurethane Foams. The Dow Chem Co 1998.

- [11] WOODS, G.: Flexible Polyurethane Foams, Chemistry and Technology. Essex, England : Appllied Science, 1982.
- [12] Dow Polyurethanes - Additives Role in Foam Formulations [online] : [cit. 2011-05-05]. Dostupné z WWW: <https://dow-answer.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/5712>.
- [13] [cit. 2010-11-26]. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXX-4P9K8Y81&_user=640831&_coverDate=10%2F31%2F2007&_alid=1548096053&_rdoc=2&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5602&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=1431&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=3a415d0bc40a8b66e66909facafac51e&searchtype=a>.
- [14] [cit. 2010-12-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.keysmatic.sk/novinka/materily-pouivan-pri-vrobe-matracov.html>>.
- [15] Testing and Application of New Phenomenological Material Model for Foam Materials [online] : [cit. 2011-01-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.posterus.sk/?p=3923>>.
- [16] GIBSON, L. J., GIBSON and ASHBY, M. F.: Cellular Solids – Structure and Properties. Cambridge : Cambridge University Press, 1997.
- [17] Akú tvrdosť matraca si vybrať? [online] : [cit. 2011-02-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.segum.sk/caste-otazky>>.
- [18] Flexible Polyurethane Foam [online] : [cit. 2011-02-07]. Dostupné z WWW: <http://www.pfa.org/intouch/new_pdf/lr_IntouchV1.1.pdf [>].
- [19] PAM - CRASH [online] : [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://zsc.zcu.cz/sw/pam-crash.html>>.

- [20] Normálne rozdelenie [online] : [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW:
<http://sk.wikipedia.org/wiki/Norm%C3%A1lne_rozdelenie>.
- [21] Metoda najmenších čtverců [online] : [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_nejmen%C5%A1%C3%ADch_%C4%8Dtverc%C5%AF>.
- [22] Kružnica [online] : [cit. 2011-03-21]. Dostupné z WWW:
<<http://sk.wikipedia.org/wiki/Kru%C5%BEnica>>.
- [23] Koule [online] : [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Koule>>.
- [24] Co je trilaterace? [online] : [cit. 2011-03-21]. Dostupné z WWW:
<http://eu.mio.com/cs_cz/global-positioning-system_co-je-trilaterace.htm>.
- [25] [cit. 2011-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://davidan.net/M/statistika.pdf>>.

7 PRÍLOHY

Zoznam príloh

Príloha 1: Fáze dekubitov

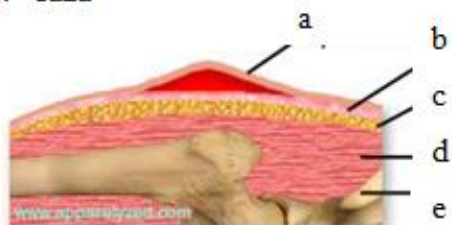
Príloha 2: Vzorky polyuretánových pien

Príloha 3: Výpočet funkcie a určenie priesečníku v programe Matlab

PRÍLOHA 1
FÁZE DEKUBITOV

Fáze dekubitov

1. fáza



a – epidermis (vrchná vrstva kože)

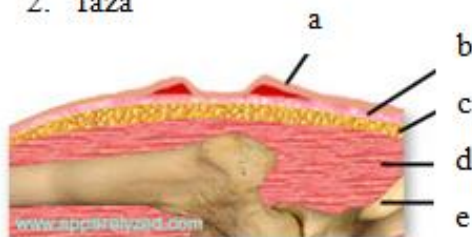
b – dermis (druhá vrstva kože)

c – podkožný tuk

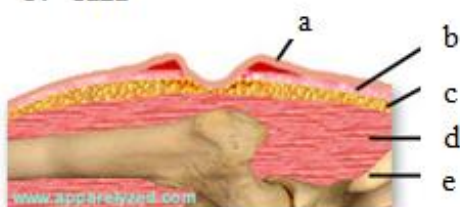
d – svalové tkanivo

e - kosť

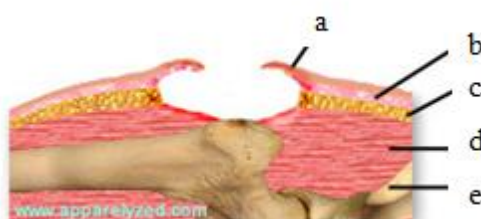
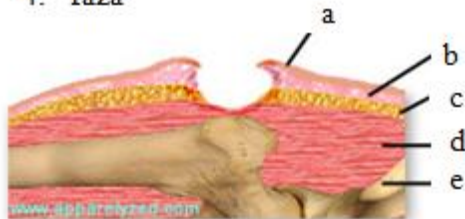
2. fáza



3. fáza



4. fáza



PRÍLOHA 2
VZORKY POLYURETÁNOVÝCH PIEN

Druhy použitých polyuretánových pien

„R“ - vysoko elastické („studené“) PU peny

„N“ - normálne PU peny

„V“ - viskoelastické („lenivé“) PU peny

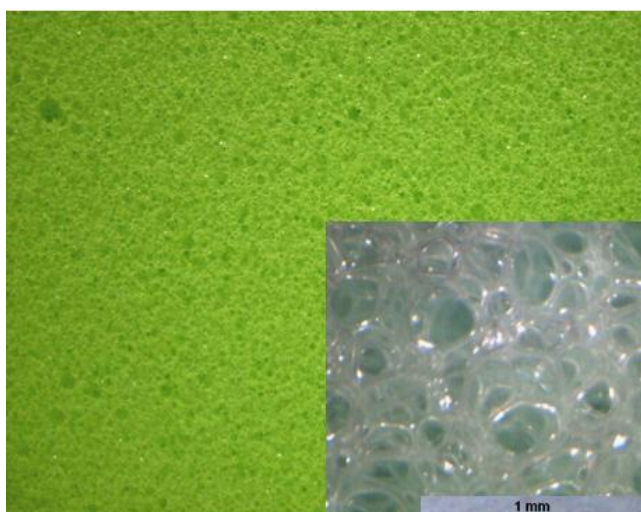
R 4036 (svetlo oranžová farba PU peny)



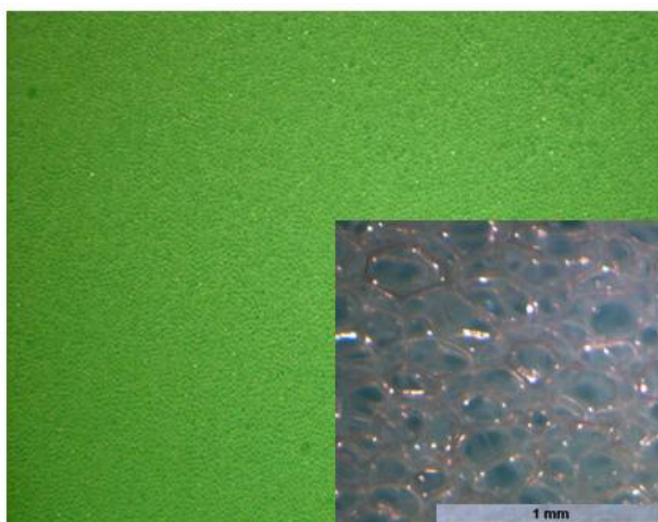
R 4535 (Svetlo zelená farba PU peny)



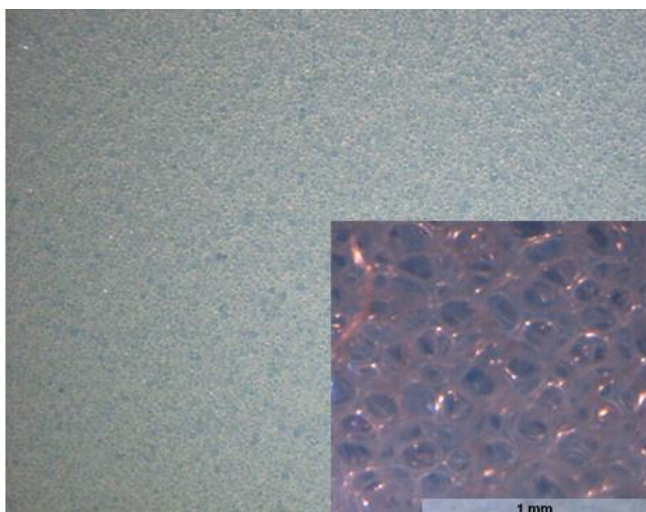
R 4542 (Svetlo zelená hrášková farba PU peny)



N 3543 (Zelená farba PU peny)



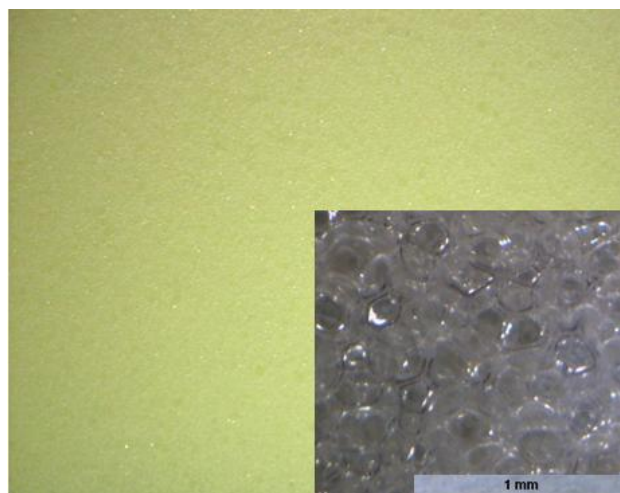
N 4050 (Svetlo modrá farba PU peny)



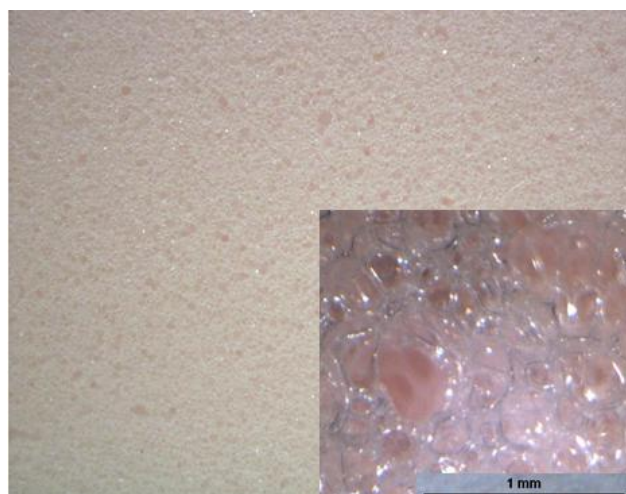
N 5063 (Svetlo ružová farba PU peny)



V 5020 (Svetlo žltá farba PU peny)



V 5025 (Svetlo ružová farba PU peny)



PRÍLOHA 3

VÝPOČET FUNKCIE A URČENIE PRIESEČNÍKU V PROGRAME MATLAB

Stanovenie parametrov nelineárnej funkcie v programe Matlab

Vzorka R 4036

% zápis distribuční funkce napětia

```
F = @(p, xx, yy) p(1) + p(2)*exp(-(xx-p(3)).^2+(yy-p(4)).^2)/
(2*p(5)^2);
```

```
S = @(p) (z - F(p, x, y)).^2;
```

% odhad parametrov A B C D E

```
set = [0 1.2420 0 0 20];
```

% spresnenie odhadu pomocou MNČ

```
p = lsqnonlin(S, set)
```

%vykreslenie 3D grafu

```
plot3(x, y, z, 'r');
```

```
hold on
```

% vygenerovanie všetkých možných hodnôt x, y (x min : x max, y min : y max)

```
[X Y] = meshgrid(-100:100, -100:100);
```

```
surf(F(p, X, Y), 'XData', X(1,:), 'YData', Y(:, 1));
```

% popis os x, y, z

```
xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('F')
```

%nastavenie vlastnosti farebného tieňovania

```
shading interp
```

```
axis square
```

```
grid on
```

```
hold off
```

% Výpočet koeficientov A, B, C, D, E v Matlabe

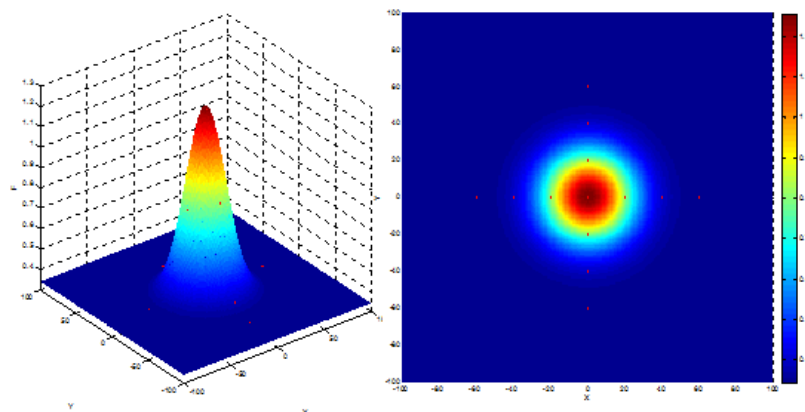
A = 0.3424

B = 0.9149

C = 0

D = 0

E = 17.0998



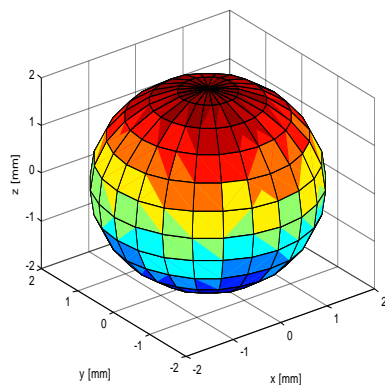
Obr. 1 Grafické zobrazenie funkcie distribúcie napätia

Zápis a výpočet priesečníku troch gúl pomocou rovníc gúl v programe Matlab

```
% výpočet funkcií
f1 = '(x-0)^2+(y-0)^2+z^2=1024';
f2 = '(x-60)^2+(y-0)^2+z^2=2116';
f3 = '(x-0)^2+(y-60)^2+z^2=1764';
%vyriešenie funkcií
s = solve(f1, f2, f3, 'x', 'y', 'z');

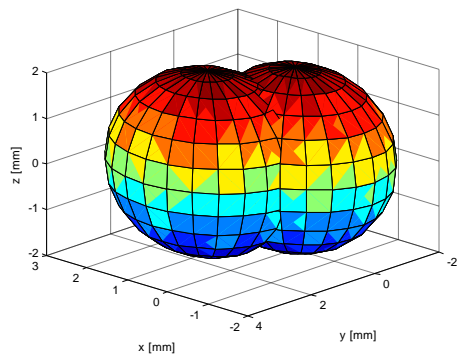
% Grafické znázornenie
a = linspace(0, 2*pi, 25)';
b = linspace(0, 2*pi, 25);

r1 = 32;
X1 = r1*cos(a)*cos(b);
Y1 = r1*cos(a)*sin(b);
Z1 = r1*sin(a)*ones(size(b));
surf(X1, Y1, Z1); hold on
```



Obr. 2 Grafické znázornenie gule

```
r2 = 46;
X2 = r2*cos(a)*cos(b)+60;
Y2 = r2*cos(a)*sin(b);
Z2 = r2*sin(a)*ones(size(b));
surf(X2, Y2, Z2); hold on
```



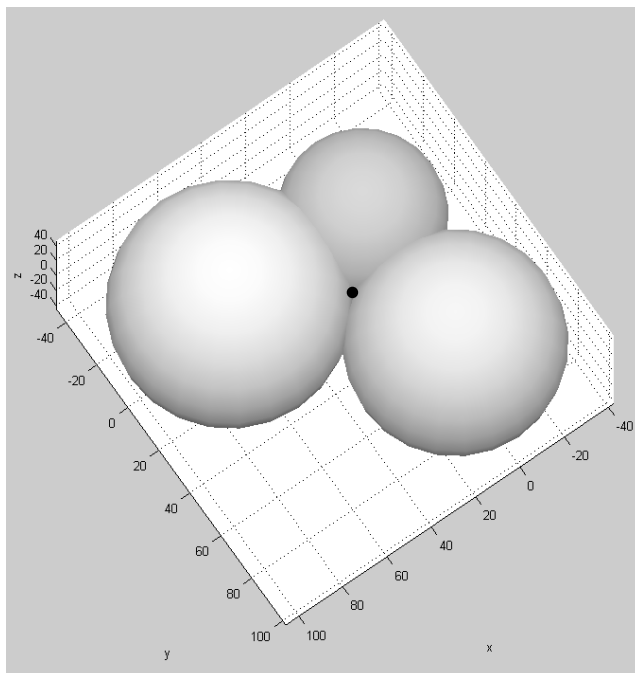
Obr. 3 Grafické znázornenie dvoch gulí

```

r3 = 42;
X3 = r3*cos(a)*cos(b);
Y3 = r3*cos(a)*sin(b)+60;
Z3 = r3*sin(a)*ones(size(b));
surf(X3, Y3, Z3); hold on
% vytvorenie 3D grafu
plot3(s.x, s.y, s.z, 'or');
axis equal; hold off; view([260 20]); shading interp
% popis os x,y,z a farebné vykreslenie obrázku sivou farbou
xlabel('x');ylabel('y');zlabel('z'); colormap gray

```

Súradnice priesečníku troch gulí: [20.90; 23.83; 4.37]



Obr. 4 Grafické znázornenie priesečníku troch gulí